

文章编号:1007-2780(2025)10-1391-32

光场操控新范式:液晶多维动态赋能

邹鑫^{1,2}, 徐子涵^{2#}, 蒙翠玲¹, 张万隆^{2*}, 袁小聪²

(1. 电子科技大学基础与前沿研究院, 四川成都 611731;

2. 深圳大学微纳光电子学研究院纳米光子学研究中心, 广东深圳 518060)

摘要:光场调控作为操纵光的核心手段,通过对光场振幅、相位、偏振、模式及波长等维度的精准操控,为复杂光场生成与功能拓展提供了关键技术路径。液晶材料凭借其介电与光学各向异性特性,协同液晶光控取向技术实现分子排列的空间编程,在光场多维度调控中展现出动态可调、集成化程度高的独特优势。本文系统分析了液晶对光场相位、偏振、振幅、模式及波长等维度的调控机制,重点讨论了液晶材料对于艾里光束、贝塞尔光束、相位涡旋光以及矢量涡旋光等结构光束的动态调控方式,阐述了液晶动态调控光场维度的最新研究进展。

关键词:光场调控;液晶;光控取向技术;结构光束

中图分类号:O753⁺.2 文献标识码:A doi:10.37188/CJLCD.2025-0150 CSTR:32172.14.CJLCD.2025-0150

New paradigm for light field manipulation: liquid crystal empowered multidimensional dynamic control

ZOU Xin^{1,2}, XU Zihan^{2#}, MENG Cuiling¹, ZHANG Wanlong^{2*}, YUAN Xiacong²

(1. Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Nanophotonics Research Center, Institute of Microscale Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Optical field manipulation, as a core method for manipulating beams, provides a key technical pathway for generating complex optical fields and expanding their functions through precise control over dimensions such as amplitude, phase, polarization, mode, and wavelength. Leveraging the dielectric and optical anisotropic properties, liquid crystal (LC) materials, combined with LC photoalignment technology to achieve spatial programming of molecular alignment, exhibit unique advantages of dynamic tunability and high integration in multi-dimensional light field modulation. This paper systematically analyzes the modulation mechanisms of LCs for dimensions including phase, polarization, amplitude, mode, and

收稿日期:2025-07-22;修订日期:2025-08-23.

基金项目:国家自然科学基金(No.62475038);深圳市科技计划(No.KJZD20240903103807010);深圳市科技创新局项目(No.JCYJ20220531103403008)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62475038); Shenzhen Science and Technology Program (No.KJZD20240903103807010); Project of Science and Technology Innovation Commission of Shenzhen (No.JCYJ20220531103403008)

#共同第一作者

*通信联系人, E-mail: zwl@szu.edu.cn

wavelength of the optical field, discusses the modulation methods of LC materials for structural beams such as Airy beams, Bessel beams, phase vortex beams, and vector vortex beams, and elaborates on the latest research progress in dynamic tuning of light field dimensions by LCs.

Key words: optical field manipulation; liquid crystals; photoalignment technology; structural beams

1 引言

光作为宇宙中最基本的物质之一,既是人类对世界的第一感知,也是认识世界的重要媒介。自宇宙大爆炸后产生的第一缕光,到古代利用“烽火”作为通信的媒介传递信号,再到即将迈入的6G光通信高速互联时代,光见证了人类的智慧和文明的发展。光场携带了光在振幅、相位、频率、偏振等多个维度上的信息,随着光学领域的迅速发展,对于新型特殊光束的需求更为显著,而光场调控作为操纵光的重要手段,通过调控光的波前分布和相位形状,可以基于多自由度实现高效光束操控,生成复杂光场等功能,赋予光场更多的可能性。目前,各类具备新颖独特性质的结构光场^[1]被陆续提出,如携带螺旋相位和拓扑特性的涡旋光场^[2-4]、具有特殊偏振和聚焦特性的矢量光场^[5]、以艾里光场^[6-8]和贝塞尔光场^[9]为代表的无衍射光场等,在微粒操控^[10]、高速大容量光通信^[11]、超分辨成像^[12]、光学微加工^[13]等领域具有广阔的应用前景。近年来,研究人员开发了光子晶体以及超构表面等光场调控技术。其中,超构表面由于具有亚波长尺度下的光波调控能力而受到研究人员的青睐,但仍然存在器件尺寸小、加工工艺复杂、难以实现动态调控等限制^[14-15]。

与此同时,传统的液晶材料也在光场调控领域焕发出崭新的活力,可以灵活操控光场的振幅、偏振、以及相位等维度。液晶是一种既具有液体的流动性和表面张力^[16],又具有晶体的光学和电学特性的有机化合物,因其自身结构的特殊对称性而具有介电和光学各向异性,在平行和垂直液晶分子长轴的方向上,呈现出不同的介电常数和折射率。在磁场、电场、热场、光场等外场调谐作用下,这种各向异性的存在会使液晶分子指向矢随之发生改变,进而改变液晶分子的有效折射率,对不同状态的入射光呈现出不同的光学性质^[17],这些特性使得液晶在显示及非显示领域展现出了巨大的应用潜力。液晶材料所呈现的各

向异性基于分子排列的有序度。液晶分子的自组装是一个热力学过程,受到边界锚定、外场波动等环境因素的共同影响。随着液晶取向技术的发展和理论研究的深入,可以构筑任意空间图案化取向的平面液晶光学元件^[18],实现从可见光到近红外、乃至太赫兹波段的复杂光场动态变换和调控。

根据分子的取向有序性差异,可以将液晶分为向列相、近晶相、胆甾相3种典型相态。其中,向列相液晶的重心排列无序,分子排列方向取决于指向矢,在外力作用下具有非常好的流动性,是最常用的液晶显示材料之一,用于液晶光栅^[19]、液晶透镜^[20]等器件。近晶相液晶则分层排列,排列方式呈方向有序而位置无序。由于液晶分子间的侧向相互作用强于层间相互作用,液晶分子只能在层内运动,各层间可以相互滑动。这类液晶的黏度和表面张力较大,并且对电场、磁场、热场等外场变化不敏感^[21]。胆甾相液晶的层内液晶分子排列方式与向列相液晶类似,又与近晶相液晶同样分层排列,其各层的分子轴方向与相邻层的分子轴方向略有偏移,分子取向整体呈现螺旋状,从而产生旋光性、圆偏振光二色性以及选择性光散射等光学特性,对温度、电场、磁场、光照、外力等刺激也有着出色的灵敏响应特性^[22-23]。

本文系统综述了液晶取向技术的发展历程,并针对光控取向技术的不同机理进行了详细阐述,重点介绍了几种主流的液晶取向技术。从传播相位、几何相位、偏振、振幅、模式以及波长这些光场维度出发,分析了液晶这种具有各向异性的电光材料如何动态操控光场的各个维度,实现对于特殊结构光束的动态调控,详细讨论了基于液晶光学器件调控光场各个维度的最新研究进展以及应用。

2 液晶光控取向技术

液晶的取向是指使液晶分子沿相对基板特

定的方向整齐排列,均匀的初始排列和良好的预倾角是液晶器件具有良好光电性能的关键。只有在宏观层面得到稳定且均匀的液晶分子排列,液晶分子才会表现出光学各向异性^[24]。目前,主流的液晶取向技术有摩擦取向技术^[25]、斜向蒸镀技术^[26-27]以及光控取向技术^[28]等。1911年,Mauguin等人发明了摩擦取向技术,利用棉绒等材料沿着特定的方向摩擦液晶取向层,从而对液晶分子产生均匀的锚定作用,使液晶分子在基板间整齐排列。作为液晶显示行业首选的取向技术,摩擦取向技术具有操作简便、成本低廉等优势,迄今为止,利用摩擦聚酰亚胺薄膜形成平行或垂直取向的技术在工业界已经十分成熟。然而,摩擦取向膜的过程中会引入静电和灰尘,在薄膜表面产生划痕,存在着许多不便之处。倾斜蒸镀技术则是将金属、氧化物等无机材料沿特定的角度蒸镀在基板表面,形成倾斜排列的取向膜层,具有优异的光热稳定性。但倾斜蒸镀的工艺条件非常苛刻,产率低下,具有一定的局限性。

近年来,研究人员提出了一些新型取向液晶

分子的方法。Gao等人^[29]基于飞秒双光子光聚合激光直写技术,制备了由聚合物条带构成的微结构,每条聚合物条带的侧壁上都分布有表面浮雕光栅结构,可以在通道内对液晶分子进行定向。Zou等人^[30]利用氧化锌(ZnO)自组装层的纳米结构定向取向液晶分子,通过将ZnO自组装到氧化铟锡(Indium Tin Oxide,ITO)基板上,调节煅烧温度改变ZnO自组装层的纳米结构,实现了液晶分子预倾角在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围的连续取向。

2.1 液晶光控取向技术机理

随着平面光学领域的发展,基于光控取向技术制备的图案化多畴取向的液晶光学元件应运而生,具有非接触式、微区内灵活多畴取向、外场可调控等优势。光控取向原理可以概括为利用特定波段的偏振光预处理聚合物基板以改变其表面各向异性,使液晶分子在基板上定向排列。因此,只需要改变入射偏振光的偏振态,对基板上不同区域分别曝光,即可以实现液晶分子在微区内的多畴取向^[31-32]。如表1所示,根据取向机理的不同,大致可分为4类。

表1 不同取向机理的光控取向技术对比

Tab.1 Comparison of photoalignment technologies with different mechanisms

光控取向机理	是否可擦写	曝光波长	优势及存在问题
光致顺-反异构	是	365 nm/532 nm	对材料的化学和热稳定性有严格要求,实用性不强 ^[33-34] 。
光交联	是	365 nm/254 nm	传统光交联型光控取向稳定性高,但不可擦写;新型可逆光交联体系中交联键在特定条件下可逆断裂与重组,但循环稳定性受限,响应时间较长 ^[35-36] 。
光降解	是	254 nm	对曝光时间和基底化学特性非常敏感,并且光降解副产物会造成污染 ^[37] 。
光致偶氮染料分子重排列	是	450 nm	具有高稳定性和高取向性,且适用于曲面或柔性基底 ^[38-39] 。

2.1.1 光致顺-反异构

光致顺-反异构(Photo-induced *Cis-trans* Isomerization)是指偶氮染料分子在偏振光作用下发生的一种可逆的顺式-反式变化。以偶氮苯单元为例,在偏振紫外光照射下,偶氮苯单元转变成顺式。此时,表面相邻的液晶分子平行取向;在可见光照射下,偶氮苯单元转变成反式,此时,液晶分子垂直于基板平面取向。这种在紫外-可见光作用下发生可逆光致顺-反异构表面就称为“控制表面”,可应用于光写入或存储等元件^[33-34]。

2.1.2 光交联

光交联(Photo-crosslinking)是指聚合物材料在紫外偏振光照射下发生的各向异性光聚合。以聚乙烯基-4-甲氧基-肉桂酰类聚合物为例,在线性偏振光照射下,支链上会发生环丁烷的轴选择性光交联反应,导致平行于偏振光方向的支链有所减少,垂直于偏振光方向的支链对液晶取向发挥更有效的作用,因而液晶分子沿垂直于紫外光偏振矢量方向取向^[35-36]。

2.1.3 光降解

光降解(Photo-degradation)是指聚合物材料

在深紫外偏振光照射下发生的各向异性光降解。以聚酰亚胺材料为例,平行于深紫外偏振光矢量的聚合物链被选择性地光降解,而垂直于偏振矢量的链没有发生变化,从而引起表面各向异性的范德华力,使得液晶分子沿着垂直于偏振矢量排列^[37]。

2.1.4 光致偶氮染料分子重排列

光致偶氮染料分子重排列(Photo-induced Molecular Rotation)是指偶氮染料分子在偏振光的作用下在平面内发生重排列的过程。以偶氮染料为例,在线性紫外偏振光照射下,当分子的吸收振子平行于紫外光偏振矢量时,分子将获得更多能量而活跃度增加,进而导致它们偏离初始位置再取向,最终沿着垂直于偏振矢量方向再取向。在这个光致偶氮染料分子重排列过程中,顺-反异构的贡献是可忽略的。因此,这类光化学稳定的有机物材料可以最大限度地避免一些如光交联、光降解甚至顺-反异构的光反应发生^[38-39]。

因为偶氮染料在光照下拥有卓越的化学稳定性,当多次改变曝光偏振矢量时,分子仍会沿着垂直于偏振矢量排列,具有可重构性。这种非接触式的取向方式可以对微区液晶分子的排列

方式进行调控,并且适用于曲面或柔性基底,促进了液晶器件在显示以及光场调控领域的广泛应用^[40-43]。

2.2 液晶光控取向技术分类

目前主流的液晶光控取向技术主要分为4种:图案掩模套刻偏振曝光取向技术、利用全息干涉曝光获得特殊结构的取向技术、基于数字微镜阵列(Digital Micro-mirrors Device, DMD)的动态无掩模光取向技术、以及基于空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)的光学投影曝光技术。

2.2.1 掩模曝光技术

掩模曝光技术是将特定方向的偏振光通过掩模版照射到感光材料上,被曝光区域会准确地记录下光的偏振信息,未曝光区域则保持原样。如图1(a)所示,Hu等人^[44]采用两步法掩模曝光技术取向偶氮染料层实现相邻区域的不同排列,进而诱导液晶分子取向,成功制备了一维及二维相位光栅器件。利用掩模曝光技术进行光配向较为简单,只需要设计特定样式的掩模版就可以制备需要的光学器件,但是对于复杂取向的光学器件,对于不同偏振需要设计对应的掩模版进行

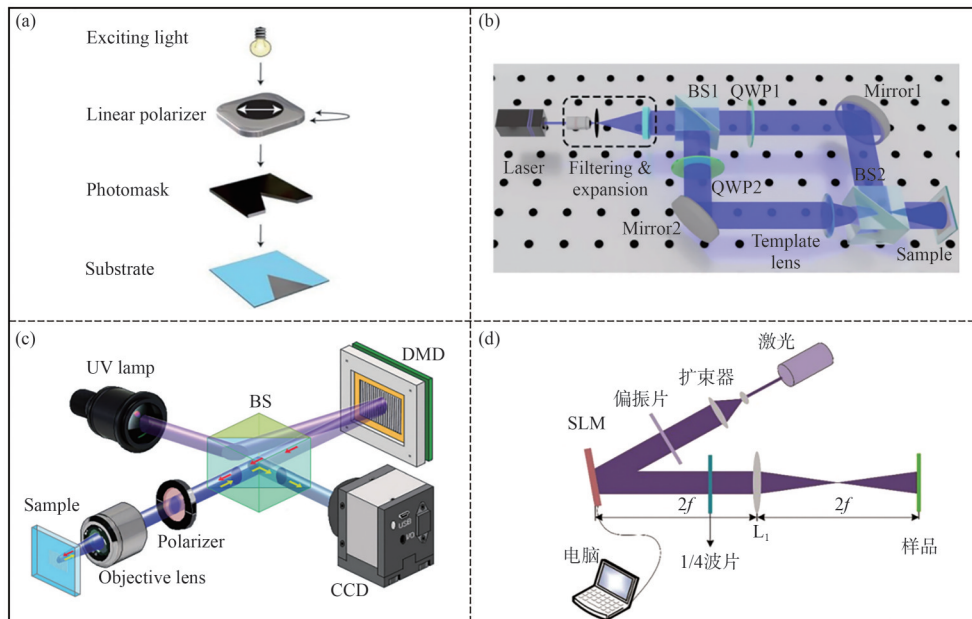


图1 光控取向技术系统示意图。(a)掩模曝光技术^[44];(b)全息干涉曝光技术^[46];(c)基于DMD的动态无掩模光取向技术^[48];(d)基于SLM的单步光学投影曝光技术^[50]。

Fig. 1 Schematic diagram of photoalignment systems. (a) Photomask exposure technology^[44]; (b) Holographic interference exposure technology^[46]; (c) Dynamic maskless photoalignment technology based on DMD^[48]; (d) Single-step optical projection exposure technology based on SLM^[50].

多次曝光,由于掩模版价格昂贵导致生产成本过高。

2.2.2 干涉曝光技术

干涉曝光技术则极大改善了上述问题,如图1(b)所示。传统的双光束干涉曝光技术利用两束相干光干涉形成亮暗条纹,代替掩模版曝光光敏取向层来诱导液晶分子周期性排列。这种方法操作简单,但无法曝光非周期性图案^[45]。针对这一不足,研究人员逐步开发了单光束干涉、全息印制以及偏振体全息等干涉曝光技术。Xiong等人^[46]提出的“全息印制”概念是基于全息器件本身的特性,利用反射光和入射光的自干涉形成与原始全息图案一致的偏振图案,传递给光取向层进而诱导液晶分子图案化排列。此项技术有望曝光制备大面积元件,进一步推动平面液晶光学元件的工业化应用。

2.2.3 动态无掩模曝光技术

基于DMD的动态无掩模曝光技术是将目标光轴排列以线偏振信息的形式写入偏振敏感的光取向层,进而引导液晶微区取向。Wu等人^[47]开发了一套基于数控微镜阵列芯片的微缩投影式曝光系统,如图1(c)所示。均匀准直的紫外光被反射到DMD芯片上,DMD作为可以实时调整的动态模板,通过电脑控制端输入不同的图形,同步旋转偏振片角度可便捷地实现任意取向分布的液晶微结构^[48-49]。结合自上而下的液晶自组装特性与自上而下的光取向技术,可以实现对于各种相态的多层级液晶的精确操控。相比于其他曝光技术,这一方法更为灵活,无需掩模,成本更低,但对于大尺寸基板需要拼接曝光,要求高精度对准,其性能仍然有待提升。

2.2.4 光学投影曝光技术

基于SLM的光学投影曝光技术能够以像素级精度控制输出光的偏振方向,实现对局部区域液晶指向矢的自由取向,制备具有任意复杂图案化设计的液晶器件。Liu等人^[50]基于这一方法,通过单步曝光即可实现多偏振和位相分布,制备任意复杂的几何位相光学元件,相比于其他曝光技术,效率极大提升,在制备连续相位变化的几何位相器件中具有更大的优势。Meng等人^[51-52]基于更为简便的微显示器投影曝光系统,利用偏振化蓝光图案化定向光取向层,制备了各种复杂的

液晶拓扑图案,极大促进了光控取向技术应用于软光子拓扑领域^[53]。

光控取向技术的迅速发展为基于液晶光控图案化取向的光场调控技术赋予了更多可能性。除了以上几种主流的光控取向技术之外,科研人员基于液晶器件功能化需求也提出了其他的一些方法。Guo等人^[54-56]提出了可同时调制光强和偏振方向空间分布的等离激元超掩模版技术,实现了高质量的液晶分子排列,分辨率达300 nm左右。Shi等人^[57]基于双光子效应在激光聚焦区域激发偶氮苯染料分子重定向。这种逐点写入的方式能够精准调控液晶聚合物的取向,具有极高的分辨率。Cai等人^[58]通过设计灰阶掩模版控制液晶盒中相分离复合膜的微结构形貌,基于聚合物/液晶复合材料内部的光聚合诱导相分离,只需要单步曝光就可以制备大面积液晶微透镜阵列。

3 液晶光场调控

在现代光子技术体系中,光场的多维度精准调控是突破性能瓶颈的核心命题——光场的振幅、偏振、空间模式、相位、传播方向及频率等特性,直接决定光与物质的相互作用规律及信息编码方式。光场作为电磁辐射的载体,其时空演化特性是刻画光传播、干涉、衍射等行为的物理基础,光场的电场矢量时空分布如式(1)所示:

$$\vec{E} = A \cdot \hat{e} \cdot u(\vec{r}) \cdot e^{i\varphi(\vec{r})} \cdot e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)}, \quad (1)$$

其中: A 代表振幅,表征光强的空间分布幅度,决定光场能量的空间衰减规律; \hat{e} 代表偏振,定义电场振动的方向,刻画光场的偏振各向异性; $u(\vec{r})$ 代表模式,描述光场的空间形态,包含偏振方向空间变化的矢量光束以及携带轨道角动量的涡旋光束等特殊模式; $\varphi(\vec{r})$ 代表相位,决定波前的几何结构;角频率 ω 代表光的频率;波矢 \vec{k} 代表光的传播方向; \vec{r} 是三维空间中的位置矢量。

液晶作为一类典型的电光功能材料,其分子指向矢可通过电场以及图案化曝光实现精准调控。利用液晶的双折射效应及取向分布的空间编程,可对光场的多个维度实施动态独立或协同操控。

3.1 传播相位调控

对于液晶在光学性质上所表现出来的各向

异性,由于液晶分子是一类双折射材料,在沿着其长轴和短轴的光学折射率分别表现为非寻常光折射率 n_e 和寻常光折射率 n_o ,其双折射率 Δn 表示为:

$$\Delta n = n_e - n_o. \quad (2)$$

在无外场作用力的情况下,液晶分子指向矢将沿着取向层给定的方向排列。当入射光的偏振方向与光轴呈一定夹角 θ 时,有效折射率 $n_{\text{eff}}(\theta)$ 表示为:

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}}. \quad (3)$$

入射光经过液晶层后所产生的相位延迟 $\Gamma(\theta)$ 为:

$$\Gamma(\theta) = \frac{2\pi}{\lambda} d \cdot n_{\text{eff}}(\theta), \quad (4)$$

其中: λ 为入射光的波长, d 为液晶层的厚度。通过施加电场调控液晶分子取向,可以在光波前引入定制化相位梯度,对光场的相位维度进行空间编程。

3.1.1 液晶光学相控阵

液晶光学相控阵基于液晶的电光效应以及闪耀光栅的原理,通过控制各通道光束的相位,

实现阵列光束整体偏转或者相位误差补偿^[59-60]。近年来,以液晶光学相控阵为主的非机械式光学扫描技术快速发展,朝着实现更宽扫描范围、更快响应速度、更大通光口径等研究方向不断深入^[61-62]。Wang 等人^[63]在改进大口径光学相控阵的基础上,提出了一种基于多子阵并行驱动和两级器件级联的新型大口径实现方案,如图 2(a)所示。改进后的器件结构采用电极分区的方法,将液晶相控阵天线的单一公共电极拓展为分区控制的阵列电极,通过对电极分区驱动,在单个相控阵天线上实现了大口径相控光束控制。此外,液晶光学相控阵技术在近红外波段已经非常成熟,随着中红外波段激光器的需求扩大,Wang 等人^[64]研发了中红外波段的液晶光学移相器,如图 2(b)所示。在波长为 $3.9 \mu\text{m}$ 的中红外波段激光照射下,液晶光学移相器的相位调制达到 2.59π ,外加电压值从 2.65 V 增加到 3.37 V 仅需 19 ms ,满足较高盒厚条件下的快速响应条件。在可见光波段,Milica Notaros 等人^[65]利用向列相液晶实现了级联相位控制,在 632.8 nm 的工作波长以及 $\pm 3.4 \text{ V}$ 的工作电压下,波束指向角达到了 7.2° ,可用于可见光波段波束形成与转向。

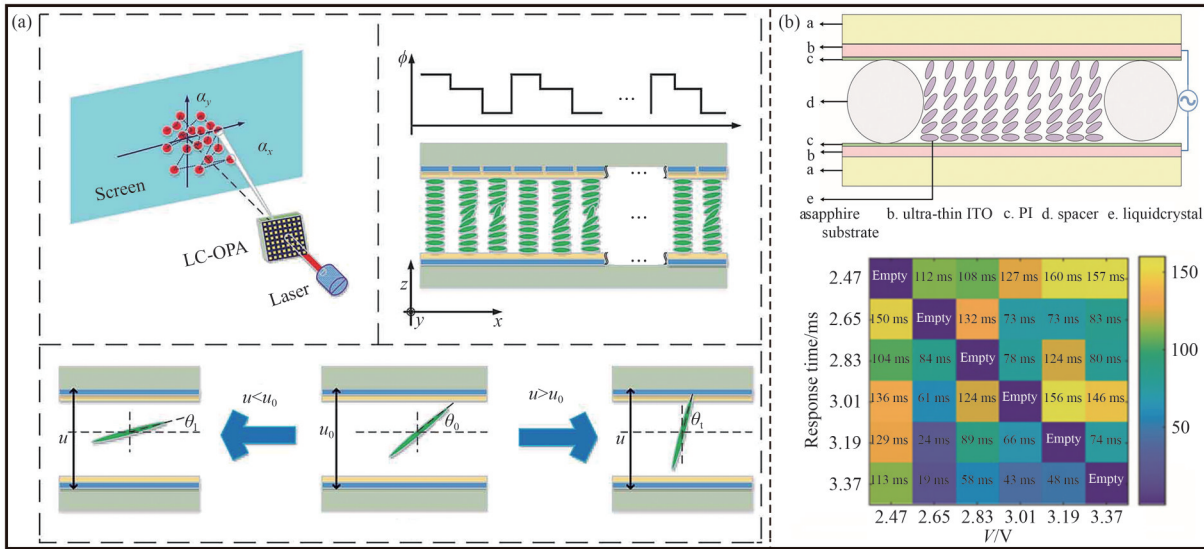


图 2 液晶光学相控阵原理。(a)利用液晶光学相控阵实现快速激光束转向的原理示意图^[63];(b)用于中红外波段的液晶光学移相器的结构及响应速度^[64]。

Fig. 2 Principle of liquid crystal optical phase array. (a) Schematic diagram of realizing fast beam steering using liquid crystal optical phase array^[63]; (b) Structure and response speed of liquid crystal optical phase shifter in middle-infrared band^[64].

3.1.2 液晶空间光调制器

液晶空间光调制器具有像素级的相位调制

能力,通过电极施加不同电压使液晶分子在面内连续取向,对光场相位进行周期性调制,实现对

于光学信号的控制和处理,在全息显示^[66-69]、光束整形^[70-72]以及光镊操纵^[73]等领域都有着重要意义。

Yuta Itoh 等人^[74]基于相位型空间光调制器

的计算成像近眼设备实现了视觉增强的效果,如图 3(a)所示,演示了对于不同距离物体的连续变焦,以及同时聚焦多个平面和缩放场景的功能,

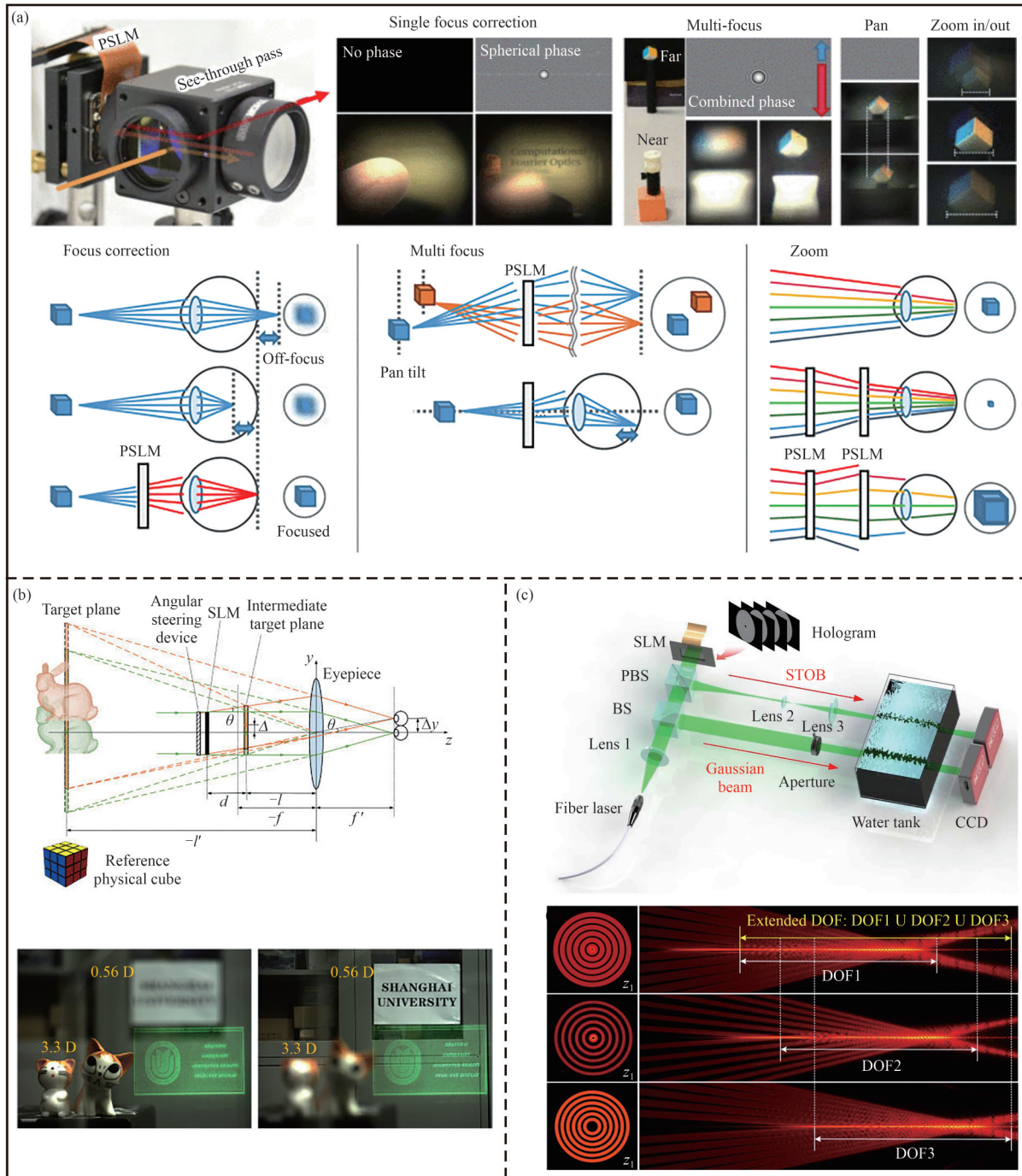


图 3 空间光调制器应用。(a)纯相位型空间光调制器系统及其调焦能力^[74]; (b)基于不同角度倾斜照射空间光调制器实现眼瞳箱扩展的系统示意图及 AR 模式下的显示效果^[75]; (c)利用空间光调制器动态调制稳定光束的实验装置图^[70]。
Fig. 3 Applications of phase spatial light modulator. (a) System and zooming ability of phase-only spatial light modulator^[74]; (b) System schematic diagram of realizing eye-box expansion based on obliquely illuminating spatial light modulator and display quality under AR mode^[75]; (c) Experimental set-up of dynamically manipulating steady optical beam using spatial light modulator^[70].

为近眼设备的设计和应用提供了新的思路。受空间光调制器带宽积的限制,全息近眼显示系统的视场角与眼瞳箱的尺寸相互制约,难以同时满足大视场角和大眼瞳箱的要求。针对此问题, Xia 等人^[75]提出了一种用于全息近眼显示的眼瞳箱静态拓展方法,如图 3(b)所示,利用相位型空间光调制器调制入射光的相位信息,经透镜聚焦后离轴投影于具有集成透镜阵列功能的全息光学元件上,在瞳孔位置形成多个出瞳,在保证视场角的前提下,拓展眼瞳箱尺寸可达到 10 mm。Yang 等人^[70]基于横向波矢干涉相消机理设计了一种具有高抗湍流性能的稳定光束,如图 3(c)所示,利用相位型空间光调制器动态调控稳定光束,突破了光束传播距离的限制,将光束的焦深提高了 26 倍。

3.1.3 液晶变焦透镜

液晶变焦透镜通过外加电场或折射率匹配方式来调节液晶层的折射率分布,对光线产生汇聚和发散的功能。当外加电场作用于液晶层时,液晶分子的倾角会发生变化,从而引起液晶层折

射率的改变,其有效折射率分布类似于透镜轮廓,入射的平面波经过液晶层后会被调制成汇聚或发散的球面波。这种利用液晶分子电光效应制备的液晶变焦透镜,可以实时调控出射光的焦距^[76-78]。近年来,电控可变焦透镜阵列因其轻薄化、响应快且驱动电压低的优势成为研究热点。Chu 等人^[79]提出了一种基于聚合物突起的液晶透镜阵列,在液晶透镜阵列下基板的周期性聚合物突起上镀 ITO 电极,使其具备恒定电势,在通电状态下,液晶透镜阵列从中心到边缘产生线性变化的垂直电场,液晶层内折射率呈中心对称的梯度分布,从而对入射光产生聚焦效果。通过改变驱动电压,该液晶透镜阵列的焦距可以从无穷大连续调节到 1.28 mm。

此外,结合目前对变焦透镜器件小型化、集成化的需求,研究人员基于超表面的概念,引入体系超薄的超透镜结合液晶以更高效地实现透镜变焦的功能^[80-81]。Melissa Bosch 等人^[82]首次提出了可变焦液晶超透镜的概念,如图 4(a)所示。将超透镜与相对成熟的液晶技术相结合,对超透

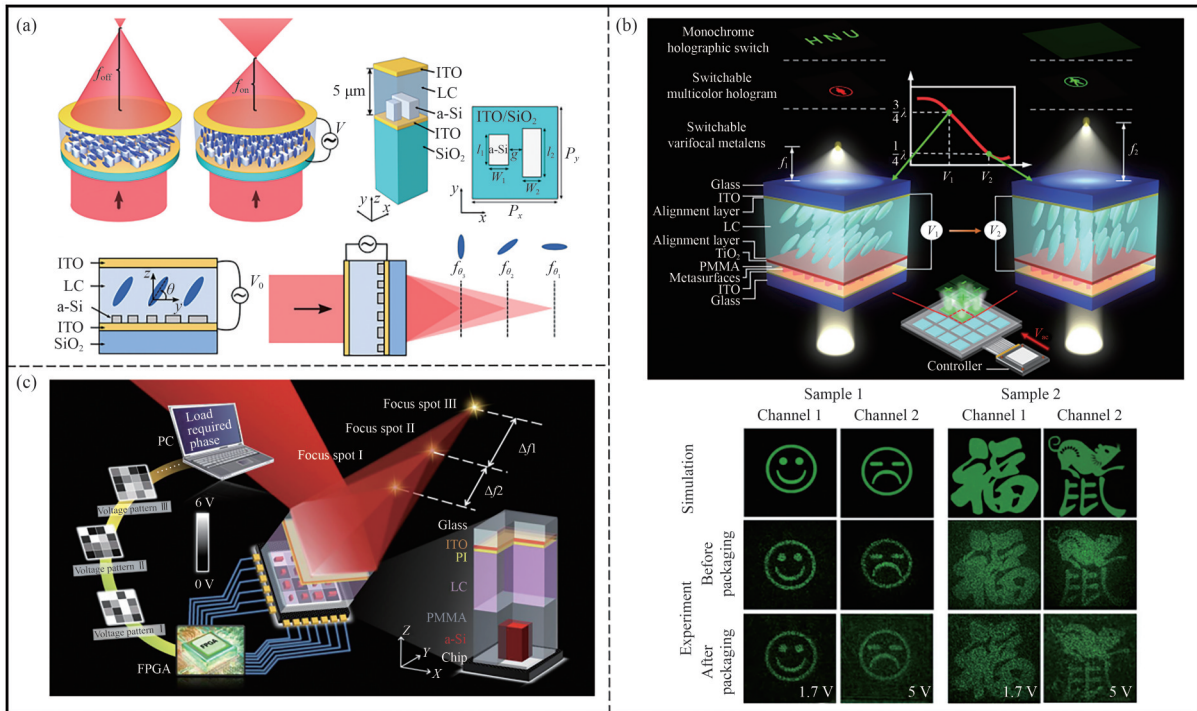


图 4 液晶变焦透镜原理及其变焦能力。(a)可变焦液晶超透镜原理及效果^[82];(b)可见光波段偏振依赖型液晶变焦超透镜^[83];(c)非机械变焦液晶超透镜原理^[84]。

Fig. 4 Principle and zooming ability of tunable liquid crystal lens. (a) Principle and results of tunable liquid crystal metalens^[82]; (b) Polarization-dependent tunable liquid crystal metalens in visible region^[83]; (c) Principle of non-mechanical tunable liquid crystal metalens^[84].

镜的局部相位响应进行设计,通过改变外加电压大小,可以调控超透镜的聚焦位置,在可连续调控的基础上,总焦距变化达 20%。Hu 等人^[83]通过集成双折射液晶,实现了可见光波段的电可调谐偏振依赖型超表面的功能,如图 4(b)所示。不同于以往研究中液晶分子直接包覆于超表面单元结构,研究团队使用低折射率材料填充超表面单元间隙,提高了器件整体的效率,实现了两个圆偏振通道的强度连续调控和切换,并演示了动态变焦超透镜的功能。

为了解决对于现有变焦超透镜存在的无法实现连续调焦以及需要机械移动的问题,Zhu 等人^[84]提出了一种结合向列相液晶的无需机械移动的电控变焦超透镜器件,如图 4(c)所示。将超表面层和液晶层分别视作摩尔透镜中的两块相对旋转的相位板,在二维电压调控下,液晶分子被重新定向以替代统摩尔透镜中的旋转操作,实现非机械连续变焦。结果表明,在 6 V 的较低电压下,最大焦距有望能够达到 180 mm。这种基于液晶的可调式超透镜为结合液晶的动态超表面提供了新的方案,在显示设备、内窥镜、夜视镜等领域具有可观的应用价值。

3.2 几何相位调控

几何相位,也称为 Pancharatnam-Berry (PB) 相位,最初由 Pancharanam 提出^[85],是光的偏振态沿闭合路径演化时累积的相位,与传播距离无关,只由偏振态演化的几何路径决定。当平面结构相对中心轴逆时针旋转一角度时,会附带一个额外的与旋转角度相关的相位因子。

设线偏振光通过液晶层时,其取向方位角随空间坐标 (x, y) 按 $\alpha(x, y)$ 旋转,等效于快轴方向随空间变化的半波片,琼斯矩阵可以表示为:

$$J(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & -\sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \end{pmatrix}. \quad (5)$$

入射的任意线偏振光通过一定厚度且液晶分子取向 $\alpha(x, y)$ 呈空间变化的液晶层时,出射光的琼斯矢量如式(6)所示:

$$E_{\text{out}} = J(\alpha) \cdot E_{\text{in}} = \begin{pmatrix} \cos 2\alpha & -\sin 2\alpha \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(2\alpha - \phi) \\ \sin(2\alpha - \phi) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

线偏振光通过几何相位型液晶器件后,输出

光场的偏振方向旋转 2α ,附加与液晶取向相关的几何相位 $\phi_{\text{PB}} = 2\alpha$ 。液晶几何相位调控的本质是通过空间变化的分子取向,使得偏振态在庞加莱球上演化累积相位。

3.2.1 几何相位型液晶透镜

几何相位型液晶透镜通过使液晶分子指向矢在平面内在 $0 \sim \pi$ 范围内连续渐变排列,从而对光束实现整形,同时附带连续渐变的抛物线形位相分布,对左右旋圆偏振光分别产生发散和会聚的效果,并出射相反旋向的圆偏振光,达到半波条件时,理论上衍射效率可达 100%。Jiang 等人^[86]基于上述提及的等离激元超掩模版光控取向技术,制备了高效率、衍射极限的几何相位型液晶聚合物透镜。对于不同尺寸和焦距比的液晶几何相位型透镜,液晶分子排列周期仅为 $1.5 \mu\text{m}$,成像质量达到了衍射极限。Chen 等人^[87]提出了一种基于几何相位型液晶聚合物的紧凑型阿尔瓦雷斯透镜,如图 5(a)所示。在 532 nm 的工作波长下,当两个液晶平面几何相位型元件的横向位移从 -5 mm 调节到 5 mm 时,整个透镜系统的光焦度可以在 $-1.4 \sim 1.4 \text{ D}$ 连续变化。这种调焦方式使得人眼不需要聚焦在固定的显示屏上,可以有效减少视觉疲劳的问题。Ding 等人^[88]提出了一种新型多扭曲结构,如图 5(b)所示。开发的窄带几何相位透镜分别仅对红、绿或者蓝光响应,有效解决了液晶偏振光学元件中的串扰和色差问题,实现了消色差几何相位光学元件的功能。

胆甾相液晶具有与反射式全息光学元件类似的成像功能,并且具有强烈的偏振选择性,如图 5(c)所示。对于特定旋向的入射圆偏振光可以实现全部反射,而对于相反旋向的圆偏振光则全部透过^[89-90]。基于上述特性,如图 5(d)所示, Li 等人^[91]提出了一种宽带反射式胆甾相液晶透镜,可以同时实现反射镜的相位调制和偏振分光膜的功能,在平面光学显示系统中可代替多个光学元件的功能,以实现更加轻薄化、更高度集成化的新型光学系统。Andrew Maimone 等人^[92]结合液晶偏振光学元件与全息光学元件,用于虚拟现实显示系统的光学模组,可以实现更轻薄化。这种用薄而扁平的全息透镜代替传统的曲面透镜的概念,即 Holocake Lens^[93-94],有望在未来用于虚拟现实显示光学系统。

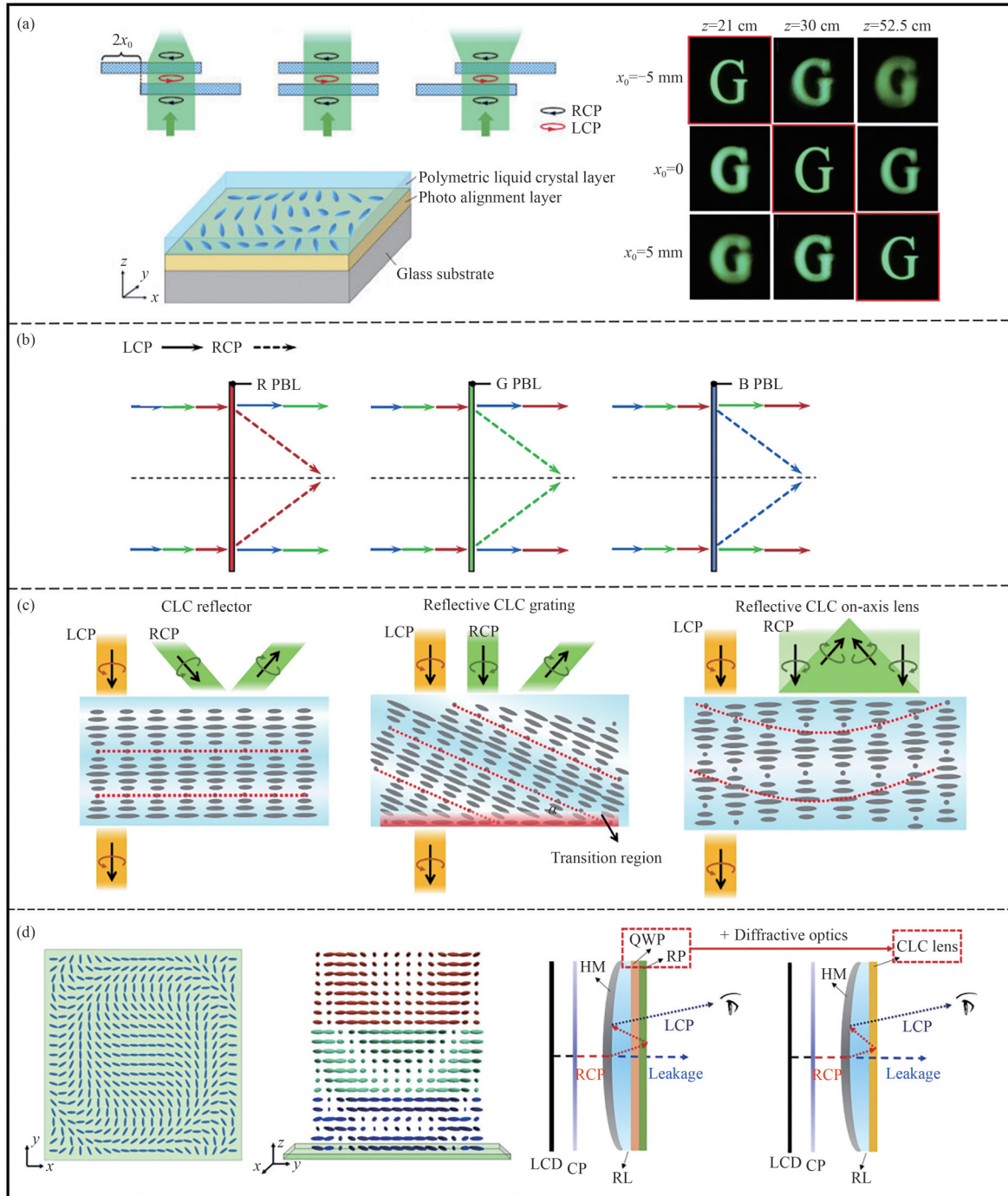


图 5 几何相位型液晶透镜的原理及应用。(a)基于几何相位型液晶聚合物的紧凑型阿尔瓦雷斯透镜^[87]；(b)窄带几何相位透镜实现消色差功能^[88]；(c)胆甾相液晶的偏振选择特性^[89]；(d)宽带反射式胆甾相液晶透镜^[91]。

Fig. 5 Principles and applications of geometric phase liquid crystal lenses. (a) Compact Alvarez lens based on geometric phase liquid crystal polymer^[87]; (b) Narrowband geometric phase lens for realizing achromatic function^[88]; (c) Polarization-selective properties of cholesteric liquid crystals^[89]; (d) Broadband reflective cholesteric liquid crystal lens^[91].

3.2.2 液晶光栅

液晶光栅是基于几何相位的光栅器件,通过光控取向或电控等方式使液晶分子的取向在一定空间范围内呈周期性排列,一级衍射效率理论

上可达 100%。同时,相比于上述液晶光学相控阵器件,液晶偏振光栅可用于实现更高效率、更大角度的光束偏折效果。Kim 等人^[95]结合液晶偏振光栅与液晶相位延迟器实现了针对不同圆

偏振态入射光的可控偏折效果,如图 6(a)所示。光束经过液晶偏振光栅后会偏离原入射方向,并且光束的偏转方向与入射光束的偏振态相关,由此实现了范围达 30° 的大角度光束偏折。Yuan 等人^[96]结合两种不同圆偏振全息光路制备了周期互补的大孔径液晶偏振光栅,通过设计铁电液晶/液晶聚合物波片组并级联不同周期的偏振光栅组件,实现了 $70 \mu\text{s}$ 级快速响应的大角度光束偏折,最大偏折角度达到了 $\pm 22.9^\circ$ 。

近年来,研究人员基于单一液晶平面光学器

件实现了丰富的光学功能,由此过渡到级联液晶器件有望实现更多独特的光学功能。He 等人^[97]通过级联液晶平面光学元件实现了光学角度放大的功能,如图 6(b)所示。级联的两层液晶平面光学器件中每一层都携带不同的相位信息,并存在一定的间隔,所需的相位分布以及空间距离可以通过光线追踪算法优化以实现接近衍射极限的光学角度放大功能。将此液晶级联器件应用于激光雷达工作波段,实现了 $\pm 27^\circ$ 的输出角,放大倍率达 5.4 倍。

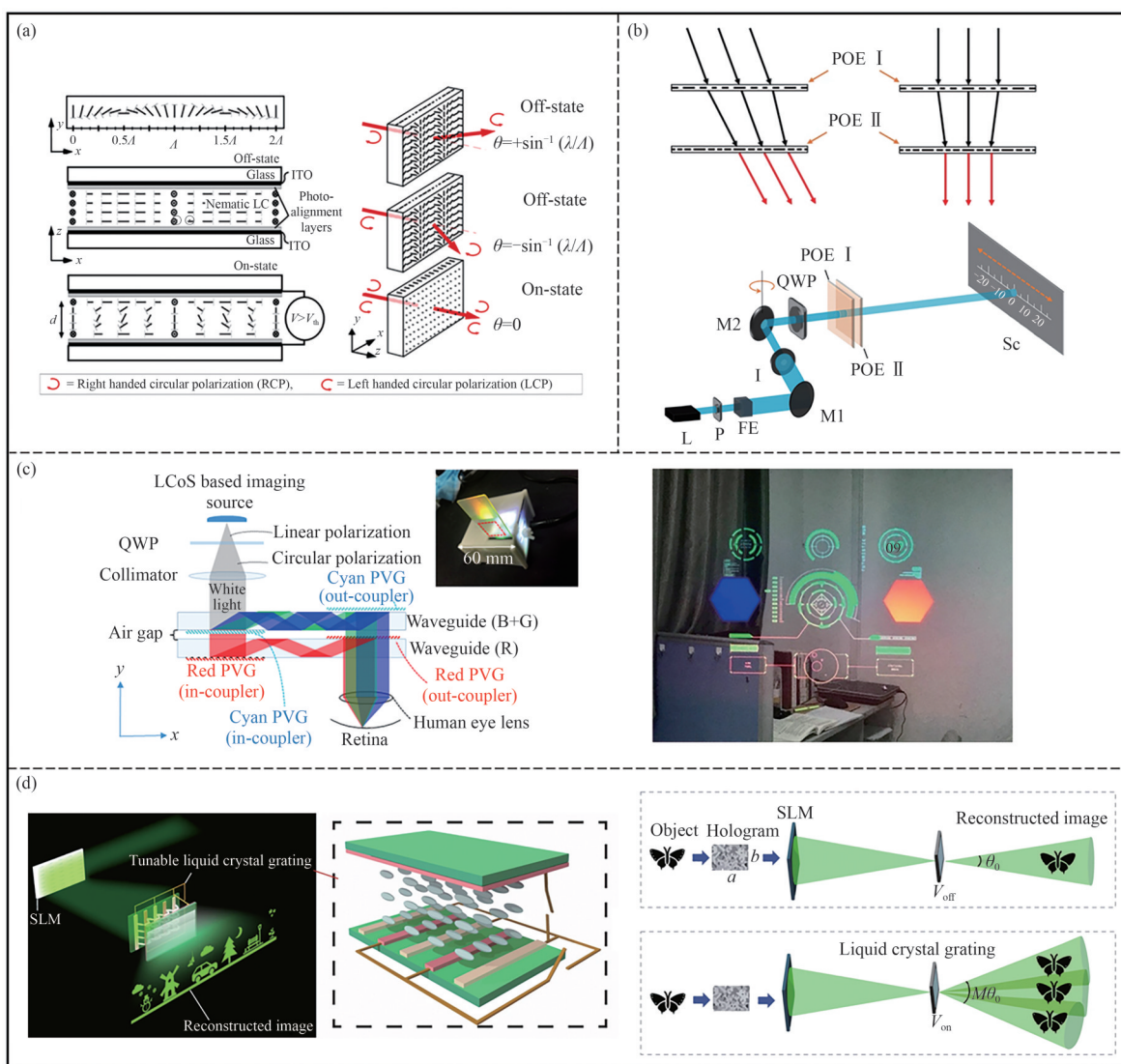


图 6 液晶光栅原理及应用。(a)液晶偏振光栅实现光束偏折原理^[95]; (b)液晶级联器件实现光束偏折^[97]; (c)多重响应的液晶偏振体光栅^[98]; (d)电控可调液晶光栅的结构及全息 3D 显示系统示意图^[99]。

Fig. 6 Principle and applications of liquid crystal gratings. (a) Principle of beam steering using liquid crystal polarization grating^[95]; (b) Cascaded liquid crystal elements for beam steering^[97]; (c) Multistimuli-responsive liquid crystal polarization volume grating^[98]; (d) Structure of electrically tunable liquid crystal gratings and schematic diagram of three-dimensional holographic display system^[99].

液晶偏振体光栅作为一类高效的体布拉格光栅,不同于液晶偏振光栅,液晶分子光轴在空间范围内周期性旋转,从而产生体布拉格效应^[100],通过圆偏振全息干涉曝光取向层诱导液晶分子按照偏振分布取向,实现横向的周期性,而纵向的周期性则通过调控掺杂在液晶中的手性材料浓度得以实现,具有较强的圆偏振选择性以及较宽的角度响应范围等优势,在近眼显示系统中可以有效缩减系统结构以实现紧凑型光学结构^[101-104]。为了解决单一响应的液晶偏振体光栅存在的制备工艺复杂以及光散射等问题,Chen 等人^[105]制备了电、光、热三重响应的液晶偏振体光栅,在可见光波长范围内可以调制液晶偏振体光栅的反射波长,具有制备工艺简单、衍射效率高等优势。如图 6(c)所示,Weng 等人^[103]在液晶分子中掺杂手性材料,产生具有二维周期性的双折射螺旋结构,实现了具有偏振选择性的高效布拉格衍射效应,设计了用于全彩近眼显示的偏振体光栅,在蓝、绿和红光光谱的衍射效率超过 80%。随后,Weng 等人^[106]又提出了基于偏振体全息波导的二维扩瞳方案,实现了近 20 倍的光瞳放大率,有效解决了现有衍射光波导技术所存在的效率低、漏光严重等问题,对 AR 衍射光波导的发展与应用有重要的意义。

随着元宇宙概念的兴起,全息 3D 显示技术作为最理想的 3D 显示技术之一,可以重构出 3D 光场的波前,提供人眼所需要的全部深度信息。Li 等人^[104]提出了一种基于可调液晶光栅的宽视角、大尺寸全息 3D 显示系统,如图 6(d)所示。当对可调液晶光栅施加电压时,液晶分子呈周期模式排列。可调液晶光栅对全息再现像进行了二次位移调制,可以通过调节可调液晶光栅的周期实现全息再现像的无缝拼接。相比于传统单个空间光调制器系统,该系统将视角扩大了 7 倍,达 57.4°,图像尺寸放大了 4.2 倍。随后,Wang 等人^[107-108]又提出了基于彩色液晶光栅的大视角全息三维显示系统,可以对红、绿和蓝色重建图像进行相同衍射角度的二次调制,避免了传统液晶光栅存在的色差问题。

3.3 偏振调控

基于光控取向的液晶指向矢排列不但可以对光的相位进行调制,还可以调控光的偏振这一

维度。扭曲型向列相液晶的偏振旋转效应通过扭曲向列相液晶中液晶分子长轴,液晶分子在上下基板间连续扭曲 90°,扭转角满足 Mauguin 条件:

$$\frac{2\pi dn_{\text{eff}}}{\lambda} \gg \phi, \quad (7)$$

其中: ϕ 为液晶分子扭转角, d 为上下基板间液晶层厚度。当入射线偏振光平行于基板一侧液晶光轴方向时,在出射面一侧放置透光轴平行于液晶光轴的线偏振片,出射光的偏振方向将与另一侧基板液晶光轴排列方向一致,沿着液晶光轴的扭转方向同步旋转 90°,视为线偏振控制器。结合电控双折射效应,这类扭曲向列相型液晶显示器在过去几十年里广泛应用于显示领域^[109-110]。

3.3.1 量子棒偏振显示

液晶调控光场偏振维度在量子点液晶显示等新型显示技术也提供了创新方案。量子棒材料对光的偏振态具有选择性发射特性,与液晶偏振调控结合可显著提升色域和亮度^[111-113]。如图 7(a)所示,Zhang 等人^[114]利用偏振背光和液晶偏振旋转器控制光取向纳米棒/液晶聚合物复合薄膜的下转换发射强度,成功开发了光学可寻址的光发射显示器,通过电驱动控制偏振方位角,实现了固定以及随机信息显示的效果。Wang 等人^[115]提出了基于液晶调制光偏振的荧光量子点显示模式,如图 7(b)所示,利用液晶调控出射紫外光偏振态,调制受到局域表面等离子体共振影响的荧光量子点光强。这种方法具有高能量利用率以及较大色域的显示模式。

3.3.2 宾主型液晶偏振片

相较于传统成像,偏振成像不仅能够提供二维空间的光强分布,还可以获得检测目标和背景的偏振信息,在工业检测、地球遥感、环境监测以及生物医学等领域都具有巨大的应用潜力^[116-117]。其中,微偏振列器件作为分焦平面型偏振成像系统的核心元件,制造高精度、高性能的偏振器件成为当下的研究热点。过去的偏振器件常采用金属线栅或者超表面阵列调控偏振状态。相对而言,液晶微偏振阵列的加工工艺更为简便,并且性能稳定,更适用于偏振成像系统。对于液晶微偏振阵列,一类是基于光控取向技术掺杂二向色性染料于液晶材料中,形成宾主效应,二向色性染料的特性如图 8(a)所示。与液晶分子相似,可将其视为棒状各向异性分子,液晶分子在其中起

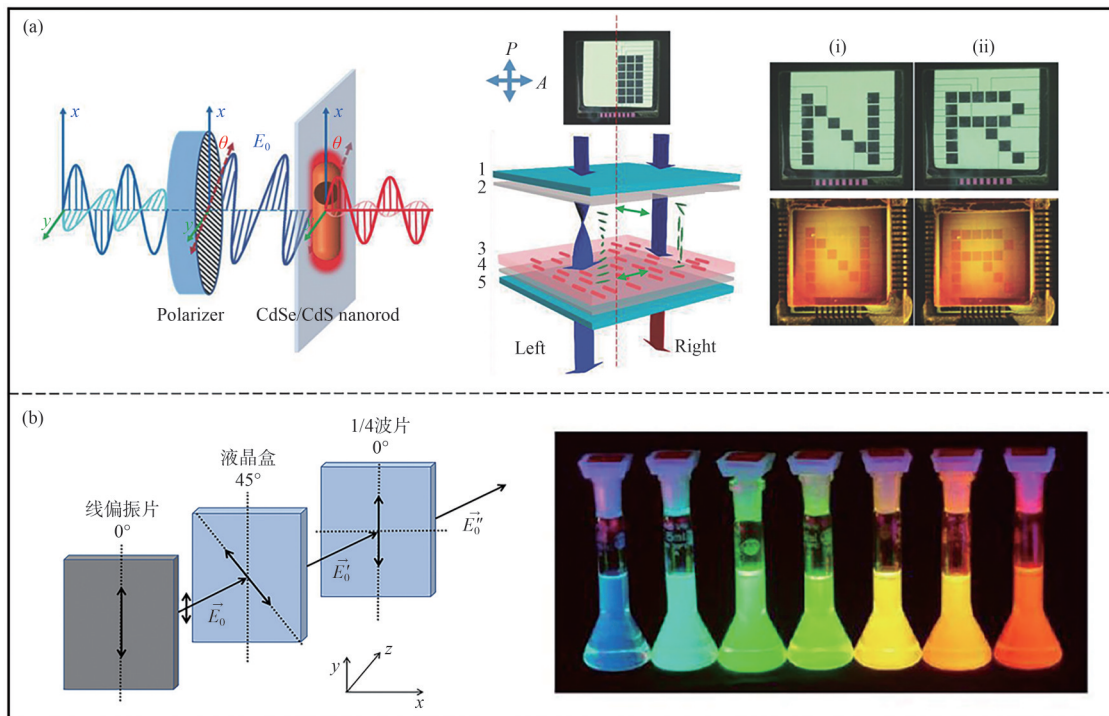


图 7 液晶调控偏振维度用于量子点显示。(a) 光学可寻址的光发射显示器^[114]; (b) 基于液晶调制光偏振的荧光量子点显示^[115]。

Fig. 7 Polarization dimension modulation by liquid crystals for quantum dot displays. (a) Optically addressable light-emitting displays^[114]; (b) Fluorescent quantum dot displays based on liquid crystal-modulated light polarization^[115].

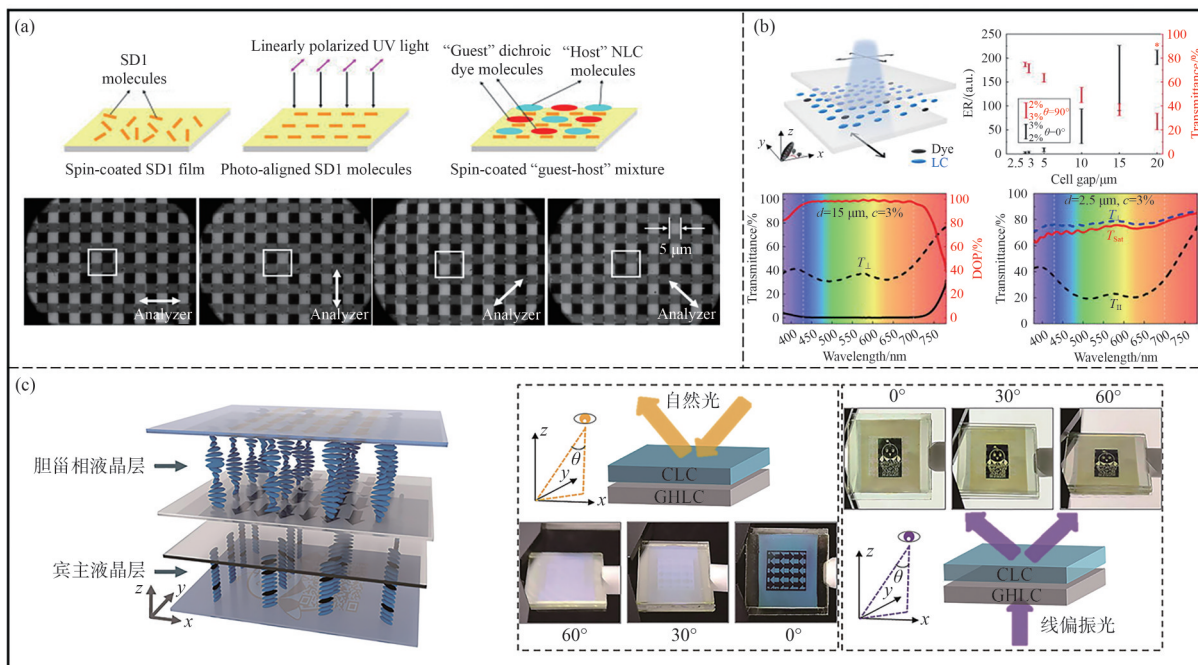


图 8 宾主型液晶微偏振片。(a) 液晶微偏振阵列^[122]; (b) 宽带空间偏振调制器^[123]; (c) 基于宾主效应的液晶防伪器件示意图^[124]。

Fig. 8 Liquid crystal micro-polarization plate based on guest-host effect. (a) Liquid crystal micro-polarization array^[122]; (b) Broadband spatial polarization modulator^[123]; (c) Schematic diagram of liquid crystal anti-counterfeiting device based on guest-host effect^[124].

到促使染料分子与其指向矢协同排列的作用^[118-119]。基于上述产生的宾主效应,通过调整液晶表面取向结构,可以制备吸光轴方向空间变化的偏振器件^[120]。Zhao 等人^[121]提出了一种基于二向色性光敏偶氮染料 AD-1 的液晶微偏振阵列,采用偏振紫外掩模曝光取向 AD-1 的方法获得了微偏振薄膜阵列,但是 AD-1 薄膜的偏振透过率以及消光比均受到了影响。在此工作的基础上,为了提升液晶微偏振阵列的性能,Zhao 等人^[122]提出了基于宾主效应的可聚合薄膜液晶微偏振阵列,如图 8(a)所示,利用紫外线偏振光照射对偶氮染料 SD1 进行分区化光控取向,将具有宾主效应的掺杂二向色性染料液晶预聚物旋涂在 SD1 表面,染料分子协同液晶分子获得良好的取向,通过光聚合预聚物形成聚合物薄膜。结果表明,所制备的薄膜液晶微偏振阵列厚度仅 0.95 μm ,偏振透过率达到了 70% 以上。Fan 等人^[123]利用液晶光控取向技术对掺杂黑色染料的液晶进行图案化配向,基于宾主效应实现了电控开关空间偏振调制器的功能,如图 8(b)所示,二向色性染料选择性的吸收入射光中与染料分子长轴平行的分量,透过与染料分子长轴垂直的分量,实现偏振选择的效果。通过优化液晶盒厚和染料掺杂浓度,制备的宾主液晶器件在 430~700 nm 波段平均偏振度达 99%,可用于产生宽带矢量光场以及检测二维偏振分布。Wang 等人^[124]提出了一种由宾主液晶防伪膜层和胆甾相液晶防伪膜层共同组成的液晶防伪器件,如图 8(c)所示,宾主型液晶所具备的各向异性可以控制透射光的偏振和强度。入射线偏振光时,宾主型液晶层充当图型化的偏振器,线偏振光先透过胆甾液晶层,同旋性的右旋圆偏振光被反射,反旋性的左旋圆偏振光透射。再透过宾主液晶层时,液晶分子对光的偏振方向进行调制,出射光的偏振状态发生变化,导致光的相位差变化。这种借助于宾主液晶层的二色性吸收与胆甾液晶层的选择性反射所实现的多维防伪器件,相较于传统单层防伪器件具备更高维度的显示光学效应,防伪效果更为显著。

3.4 振幅调控

液晶对光场振幅维度的调控本质上是通过电控双折射效应与偏振光学元件的协同作用实现的,核心在于通过电压调节液晶分子取向,改

变光的偏振态进而调控透射光强。基于振幅调控原理衍生出了液晶显示器、液晶光阀以及液晶智能窗^[125-127]等一系列调光器件。典型的液晶显示器由液晶层、入射偏振片、检偏器、玻璃基底、导电膜以及背光源组成,由背光源发出的入射光穿过液晶层后经检偏器的透射光强 I 为:

$$I = I_0 \cdot \sin^2 \Delta\phi \cdot \sin^2(2\theta), \quad (8)$$

其中: I_0 为初始光强, $\Delta\phi$ 为入射光通过液晶层产生的相位差, θ 为液晶分子长轴与检偏器偏振方向的夹角。通过调控入射光产生的相位延迟可以实现对于光场振幅维度的有效操控。

自 20 世纪 70 年代初出现了世界上第一台扭曲向列相型液晶显示设备以来,随着液晶显示技术的革新换代,液晶显示器已成为目前全球显示面板市场占比最大的显示技术,具有技术稳定、产品轻薄等优势。根据液晶分子排列方式、电场作用方向及偏振调控机制的不同,液晶显示器的主要模式分为扭曲向列相型^[109]、垂直取向型^[128]、平面转换型^[129]以及电控双折射型^[130]。扭曲向列相模式中的液晶分子在上下基板间呈 90° 扭曲排列,入射偏振片与检偏器偏振方向正交。无外加电场时,入射光随液晶分子扭曲方向旋转,通过检偏器呈现亮态;施加电场后,液晶分子沿电场方向排列,无法通过检偏器呈现暗态。从最初的扭曲向列相模式到新型的蓝相和铁电模式,液晶显示器性能的提升始终围绕着振幅调制及响应速度等方面,以应对新兴显示技术的挑战。

液晶光阀作为液晶空间光调制器的一种,具有响应速度快、透明度高的优点,可以用于实现动态全息^[131]、光学测量^[132]等功能。没有外加电场时,液晶分子呈无序排列,入射光无法透过液晶层,液晶光阀呈不透明状态;在外加电场作用下,液晶分子定向排列,光得以透过液晶层。通过调节外加电场的强度和方向,可以调控入射光的透过率,实现液晶光阀的开关功能。Huang 等人^[133]提出了基于硅酸铋光电导效应的光寻址液晶光阀,用此器件对波长为 1 053 nm 的相干光进行光束整形,与传统的薄膜晶体管液晶调制器相比,器件具有高透射率的优势,并且能够克服黑栅效应。Chen 等人^[134]研发了一种可用于高功率密度激光系统的光寻址液晶光阀,该器件可以用于高功率密度连续激光系统和高平均功率,高重

复频率的脉冲激光系统,光阀开关比达到 140:1。

3.4.1 连续域束缚态动态调控

连续域束缚态(Bound States in the Continuum, BIC)是指光场在辐射连续谱中保持局域化的特殊状态,理论上具有无限品质因子(Q 因子)和零辐射损耗,其物理本质源于结构对称性对辐射通道的严格抑制,可分为对称性保护 BIC 与偶然 BIC 两类。V. A. Fedotov 等人^[135]首次在金属超材料中观测到对称性破缺诱导的准 BIC(Quasi-BIC),其 Q 因子随结构不对称性增加而衰减,为动态调控提供了可能。

近年来,全介质超表面因低损耗特性成为 BIC 研究的主流平台。液晶材料基于电控双折射效应可以动态调制光场的振幅维度,为 BIC 的

实时调控提供了柔性方案^[136]。如图 9(a)所示, Yu 等人^[137]结合超表面与液晶的可调滤波技术,在准 BIC 超表面上涂覆液晶层,通过外加电压调整液晶分子的主轴方位角,实现了高 Q 因子、超窄带宽滤波系统的精确调谐,为开发具有改进调谐性和多功能性的高 Q 光学器件开辟了新的途径。如图 9(b)所示, Xu 等人^[138]提出了一种液晶集成超表面以打破传输方向对称性的可调谐准 BIC 器件,通过外场调控液晶分子取向改变结构折射率,实现了具有高对比度的非对称传输响应。近期, Anu Koviloor Manian 等人^[139]通过集成液晶于 WS_2 超表面,实现了对准 BIC 态的动态调控, Q 因子可达 10^4 量级,为高 Q 因子可调光电器件提供了新思路。

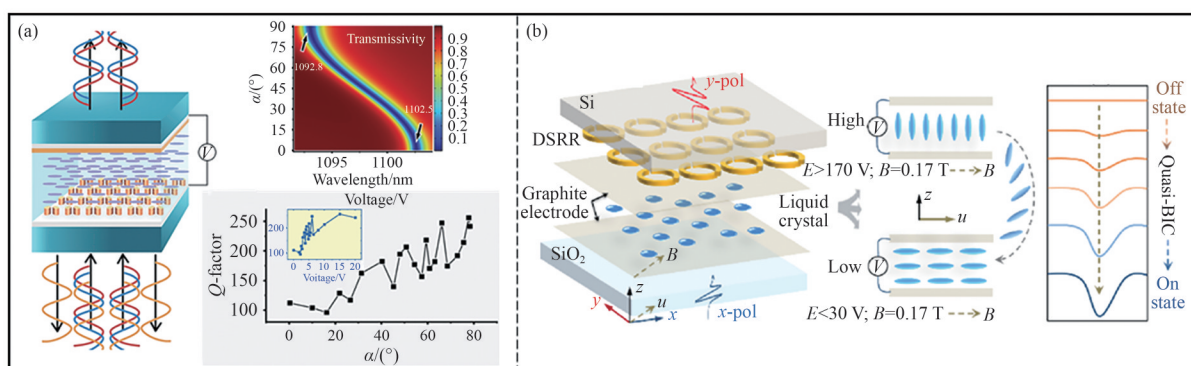


图 9 液晶集成于超表面实现 BIC 动态调制。(a)超表面集成液晶实现高 Q 因子、超窄带宽滤波系统的精确调谐^[137]; (b)液晶集成器件示意图以及准 BIC 从 Off 状态到 On 状态的主动调制^[138]。

Fig. 9 Liquid crystals integrated with metasurfaces that enables dynamic modulation of BIC. (a) Precise tunability of high Q -factor and ultra-narrowband filtering systems realized by integrating liquid crystals with metasurfaces^[137]; (b) Schematic diagram of the liquid crystal integrated device and the active modulation of quasi-BIC from the Off state to the On state^[138].

3.4.2 艾里光束

2007 年, Siviloglou 等人^[6]首次在实验中产生了有限能量的艾里光束,艾里光束的振幅分布由无量纲艾里函数描述:

$$I(x, y) \propto \left| \text{Ai} \left(\frac{x - x_0}{a} \right) \exp \left(-\frac{y^2}{2b^2} \right) \right|^2, \quad (9)$$

其中: x_0 为横向偏移量, a 和 b 分别为横向及纵向尺度因子。艾里函数的衰减特性使其在自由空间传输时,旁瓣能量以指数形式衰减,主瓣能量通过振幅的空间分布补偿衍射效应,实现无衍射传输,在障碍物遮挡的情况下具备自修复能力,并且传播过程中产生横向加速度,轨迹呈抛物线^[7-8]。这

些特性使艾里光束在微粒操控、激光加工以及水下无线光通信等领域有着独特的优势。

通过调控光场偏振态以及相位分布,结合平面液晶光学元件,可以实现对于艾里函数振幅分布的空间调制和动态调控,改变其横向加速度从而影响传播过程中的弯曲轨迹。如图 10(a)所示, Wei 等人^[140]结合动态掩模光取向技术,提出了一种液晶偏振艾里掩模,将艾里函数的指数衰减特性编码为具有立方空间变化液晶分子取向的空间函数,基于这种特殊设计演示了在正交圆偏振的双艾里光束之间进行偏振可控切换的新颖功能。Dai 等人^[141]制备了基于聚合物分散液

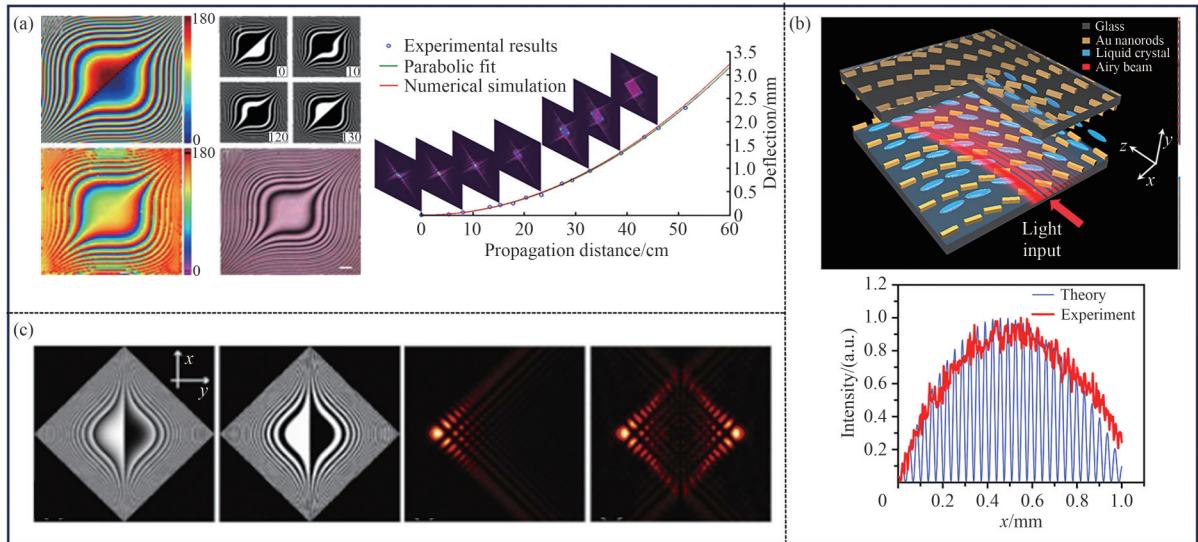


图 10 液晶光学器件生成与调控艾里光束。(a)偏振可调艾里光束^[140]；(b)基于聚合物分散液晶的二元相位元件调控艾里光束^[141]；(c)利用液晶超表面动态调控艾里光束轨迹^[142]。

Fig. 10 Generation and manipulation of Airy beams using liquid crystal optical devices. (a) Polarization-tunable Airy beams^[140]; (b) Manipulation of Airy beams via binary phase elements based on polymer-dispersed liquid crystals^[141]; (c) Dynamic tuning of Airy beam trajectories using liquid crystal metasurfaces^[142].

晶的二元相位元件,利用光刻技术制备可编程振幅全息图,如图 10(b)所示。通过施加电压改变聚合物分散液晶的折射率匹配状态,实现了艾里光束振幅分布的动态擦除与重构。艾里光束的右主瓣在 24 cm 传输距离内实现了 1.3 mm 的横向偏转,在电压控制下可在毫秒级时间内切换为具有不同振幅分布的艾里光束。Gao 等人^[142]提出一种由超表面取向向列相液晶以实现艾里光束传播轨迹大幅度动态调控的方法,如图 10(c)所示。利用超表面对液晶分子进行高精度取向,结合液晶的电控折射率特性,将艾里光耦合进液晶超表面器件,其传播轨迹可以通过电控折射率变化所诱导的线性势变化来调控,实现对于艾里光束轨迹的动态调控。

3.4.3 贝塞尔光束

贝塞尔光束也是一类典型的无衍射光束,中心光斑小,并且其轮廓不会随传播距离而发生改变。相比于传统的高斯光束,贝塞尔光束通过调节光波的相位和振幅,可以有效减少光的横向扩散和纵向衰减。贝塞尔光束的振幅在径向方向上遵循贝塞尔函数 $J_0(kr)$,其中 k 是横向波数, r 是径向距离。这种分布使得光束在中心有一个主瓣,周围环绕着同心的旁瓣,形成类似环形的结构^[143-144]。Ouaighiri-Idrissi 等人^[145]基于相位型

液晶空间光调制器,生成了轴向强度任意变化的贝塞尔光束。Shen 等人^[146]基于光控取向图案化液晶聚合物薄膜,如图 11(a)所示,制备了包括贝塞尔光生成器在内的太赫兹光子元件,并验证了偏振控制、波束扫描等用于太赫兹波段无线通信的基本功能。Liu 等人^[147]基于改变光自旋霍尔效应中自旋态的分离轨迹这一难题,设计了一种液晶几何相位元件用于实现贝塞尔光束振荡的光自旋霍尔效应,如图 11(b)所示,通过引入具有自旋相关相位梯度的几何相位元件,使光自旋霍尔效应显著增强,实现了光子自旋态以环流、交流形式的相互分离。

3.5 模式调控

在光场调控的前沿领域,相位涡旋光与矢量涡旋光因其独特的波前结构和量子化物理属性,成为精密光学操控与高维信息编码的核心载体。液晶材料凭借其电控分子取向的时空可编程特性,在光场模式调控中展现出卓越的动态重构能力。通过精准调制光场的相位分布与偏振态空间演化,液晶器件可高效生成携带轨道角动量的相位涡旋光及具有复杂偏振结构的矢量涡旋光。这种基于液晶的模式调控技术,不仅突破了传统光学元件的静态局限性,更构建了从单模操控到多维模式复用的全链路调控体系,为量子信息处

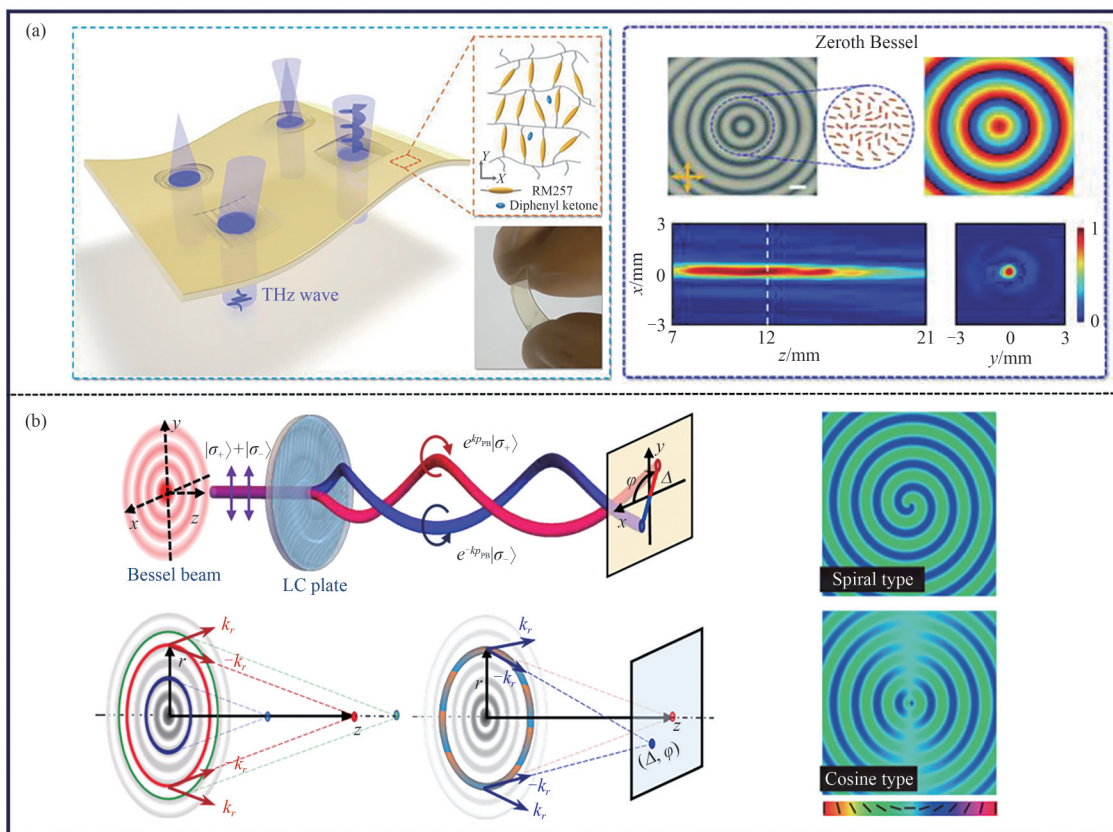


图 11 液晶光学器件产生与调控贝塞尔光束。(a)太赫兹波段贝塞尔光束产生器^[146];(b)利用液晶几何相位元件实现贝塞尔光束振荡的光自旋霍尔效应^[147]。

Fig. 11 Manipulation and generation of Bessel beam with liquid crystal optical elements. (a) Bessel beam generator at terahertz band^[146]; (b) Controllable oscillated spin Hall effect of Bessel beam realized by liquid crystal Pancharatnam-Berry phase elements^[147].

理、超分辨成像及微纳加工等领域开辟了新的技术路径。

3.5.1 相位涡旋光

自 1992 年 Allen 等人^[148]首次提出轨道角动量的概念以来,光学领域对这一物理量的认知与探索进入了全新阶段。该研究表明,具有螺旋相位分布的涡旋光束中每个光子均携带轨道角动量,轨道角动量也因此成为研究人员最感兴趣的光学模式之一。携带轨道角动量的涡旋光束表示为:

$$E = E_0 \exp(i l \theta) \exp(-i k z), \quad (10)$$

其中: E_0 为振幅, l 为涡旋光的拓扑荷数, θ 为方位角, k 为波矢量, z 为传播距离。轨道角动量作为涡旋光束的固有属性,能够将平面波转化为具有螺旋形式的波前分布,利用不同模式的轨道角动量光束间的正交性可增大光通信容量,近年来广泛应用于量子计算、微粒捕获、光通信等领域^[149-151]。

目前用于产生涡旋光束的方法大多利用螺旋相位板^[152-153]、Q波片^[154]以及叉形光栅^[155]等光学元件。Hu 等人^[156-157]为了解决限制轨道角动量模式复用与波分复用技术的问题,基于图案化光控取向技术制备了液晶叉形光栅以及达曼光栅等用于产生涡旋光束,如图 12(a)所示。Chen 等人^[158]利用胆甾相液晶自组装螺旋结构开发了一种宽带多路并行轨道角动量处理器,通过实验验证在 116 nm 波长范围内能够产生 25 个轨道角动量模式,实现了轨道角动量混合态涡旋光束的模式解复用。如图 12(b)所示,Zhang 等人^[159]利用胆甾相液晶的自旋选择性以及外场刺激响应特性,基于热响应型手性液晶超结构实现了对光子自旋角动量和轨道角动量的动态可控检测。此外,如图 12(c)所示,Liu 等人^[160]通过集成几何相位液晶微纳结构,实现了偏振及模式分布可控的轨道角动量光束三维阵列,为轨道角动量的多模式、

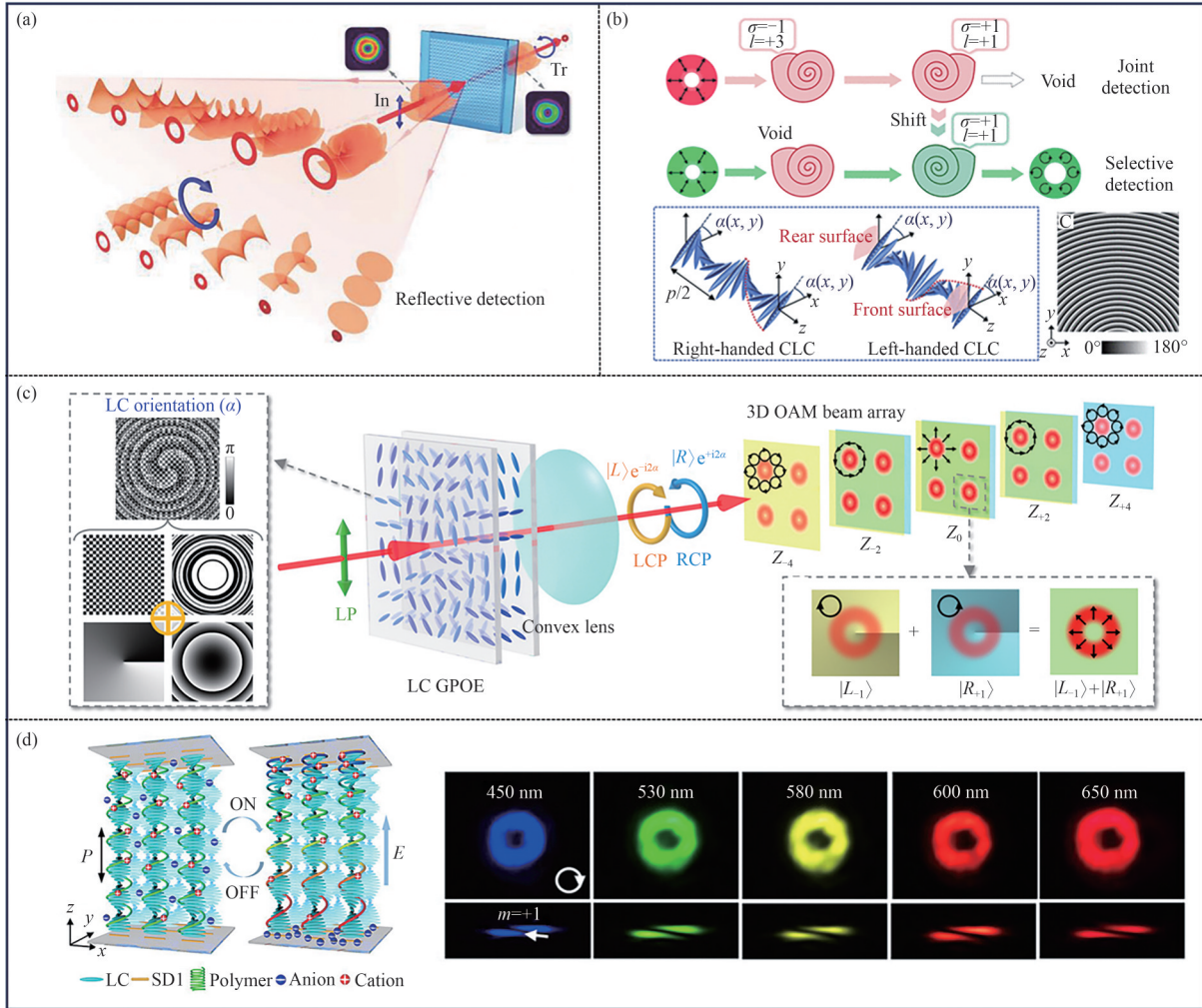


图 12 液晶光学器件调控产生轨道角动量光束。(a)基于胆甾相液晶自组装螺旋结构的轨道角动量处理器^[158]；(b)基于手性液晶超结构实现轨道角动量光束的动态检测^[159]；(c)生成三维轨道角动量光束阵列^[160]；(d)光子禁带带宽可调轨道角动量处理器^[161]。

Fig. 12 Manipulation and generation of orbital angular momentum beam with liquid crystal optical elements. (a) Self-assembled chiral superstructures for orbital angular momentum processing^[158]; (b) Self-assembled chiral superstructures for dynamical detection of orbital angular momentum beam^[159]; (c) Generation of three-dimensional orbital angular momentum beam array^[160]; (d) Orbital angular momentum processors with electrically tailored working bands^[161].

多通道操控开辟了新道路。如图 12(d)所示,针对实现胆甾相液晶在可见光范围内工作带宽的电调谐这一难题,Xu 等人^[161]利用聚合物稳定胆甾相液晶,实现了光子禁带的带宽可调,并验证了动态轨道角动量复用全息涡旋光检测功能。

研究人员对于轨道角动量的研究,从最初的基本性质探索到用于微粒操控和光学捕获,迄今已拓展到光通信、光学加密等领域。Fang 等人^[162]首次将轨道角动量全息技术应用于高安全加密领域,如图 13(a)所示。该方案利用光的轨道

角动量在空间频域中展现的高选择性和无螺旋模数限制的特性,实现了安全加密的 10 位轨道角动量编码全息图。Zhou 等人^[163]提出了一种基于偏振和轨道角动量加密的矢量全息方案,使用全介质双折射超表面和携带轨道角动量的入射光用于信息加密。不同于以往研究,携带不同拓扑荷数的轨道角动量为全息加密提供了额外的安全性和自由度,通过选择不同的输入和输出偏振通道,可以实现轨道角动量选择器的作用。Kong 等人^[164]将高维角动量纠缠态引入全息成像,验证

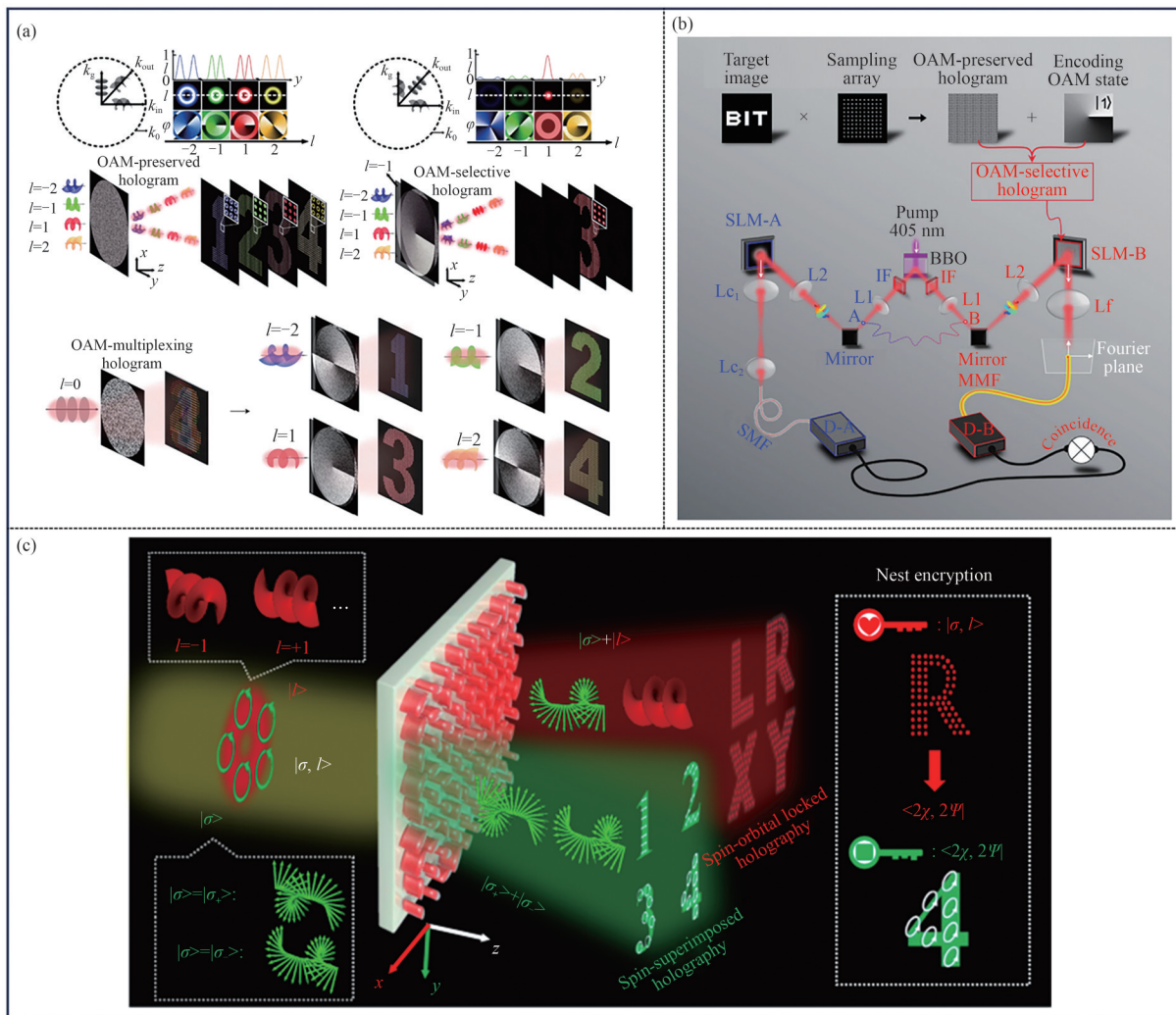


图 13 轨道角动量应用于光学加密领域。(a)高安全性能加密的轨道角动量全息技术^[162]; (b)轨道角动量加密的复用超表面全息^[164]; (c)用于光学嵌套加密的超表面轨道角动量全息技术^[165]。

Fig. 13 Orbital angular momentum for optical encryption field. (a) Orbital angular momentum holography for high-security encryption^[162]; (b) Orbital angular momentum-encrypted multiplexed metasurface holography^[164]; (c) Orbital angular momentum holography via metasurface for optical nested encryption^[165].

了此项工作能够提高全息图像加密的安全性,如图 13(b)所示。研究人员引入了轨道角动量态的强选择方法,通过复用多个具有轨道角动量态的强选择性全息图,实现了高维轨道角动量复用量子全息,大幅提升了量子全息携带信息的能力。Yang 等人^[165]解决了以往多功能复用器件效率和串扰的限制,基于极简的超表面结构协同自旋和轨道角动量作为信息复用的载体,实现了角动量全息的功能。图 13(c)展示了具有 16 个独立通道的角动量全息,利用实现的双功能角动量全息,实现了光学嵌套加密的方案,可用于实现超高容量的多用户信息安全传输。

3.5.2 矢量涡旋光

矢量涡旋光也可称为柱矢量光束,是一种兼具矢量光束和涡旋光束特性的新型结构光束,具有各向异性的涡旋偏振态分布和螺旋形相位波前的轨道角动量。矢量涡旋光束可以视为角量子数绝对值不同且旋向相反的圆偏振涡旋光场的相干叠加^[166],不同模式分布的矢量涡旋光可由杂合庞加莱球球面上的点表征。其中,位于赤道上的矢量涡旋光束表示为:

$$|\psi\rangle = A(r) \exp(i l_p \varphi) \begin{bmatrix} \cos(p\varphi + \theta_0) \\ \sin(p\varphi + \theta_0) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

其中: $A(r)$ 为振幅分布函数, l_p 为 Pancharatnam

拓扑荷, p 为偏振阶次, φ 为方位角, θ_0 为初始偏振方向。

近年来, 研究人员利用激光谐振腔、光纤、超表面等器件用于产生矢量涡旋光^[167-168], 然而, 这些方法存在转换效率低以及损伤阈值低的缺点。液晶器件由于高效率、高灵活度以及结构紧凑等优势为产生高质量矢量涡旋光提供了更好的选择性。Tang 等人^[169]通过叠加不同阶次的液晶聚合物涡旋波片和 1/4 波片产生了矢量涡旋光束, 如图 14(a) 所示, 通过改变涡旋波片的阶次, 可以生成任意拓扑荷和偏振级数的矢量涡旋光束。

Weng 等人^[170]利用琼斯矩阵推导了将入射的线偏振光转换为任意阶柱矢量光束的偏振转换器原理。基于此原理, Liu 等人^[171]通过结合低阶柱矢量光转换器和半波片, 调节不同阶数液晶涡旋波片的数量, 可以灵活调节柱矢量光的阶数, 生成任意阶柱矢量涡旋光。如图 14(b) 所示, Lou 等人^[172]提出并通过实验验证了组合电介质液晶涡旋波片与螺旋相位板的方法, 用于产生混合阶庞加莱球上任意点的矢量涡旋光束。在此工作的基础上, 如图 14(c) 所示, Zhou 等人^[173]基于两个不同阶次的可电控液晶涡旋波片以及液晶

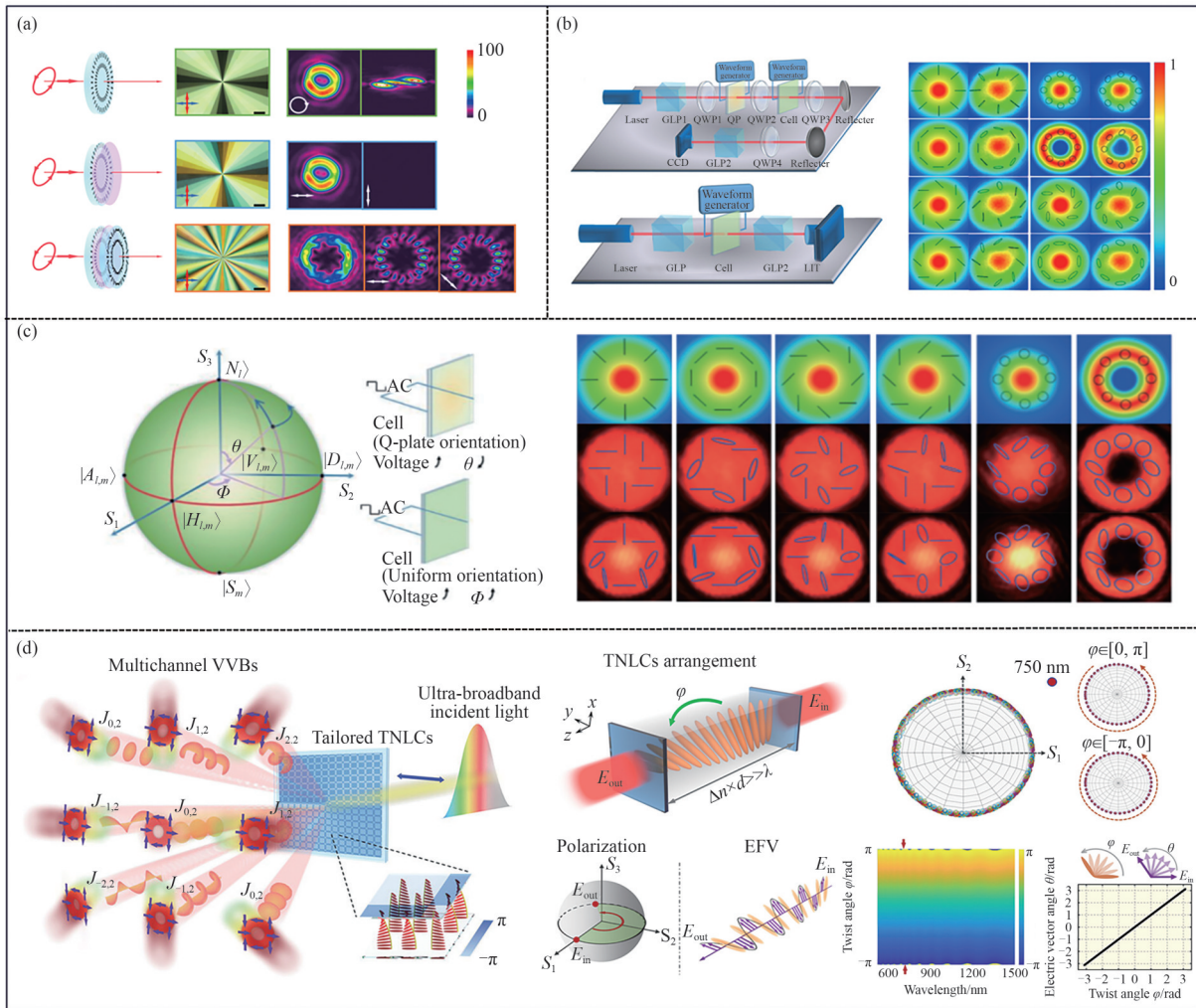


图 14 液晶光学器件用于调控生成矢量涡旋光原理。(a) 生成具有任意拓扑荷和偏振级数的矢量涡旋光^[169]; (b) 生成混合阶庞加莱球上任意点的矢量涡旋光^[172]; (c) 纯电控法实现两混合阶庞加莱球间任意矢量涡旋光的切换^[173]; (d) 生成超宽带范围矢量涡旋光阵列^[174]。

Fig. 14 Principle of manipulating and generating vector vortex beam by liquid crystal optical elements. (a) Generation of vector vortex beam with arbitrary topological charges and polarization orders^[169]; (b) Generation of arbitrary vector vortex beam on hybrid-order Poincaré sphere^[172]; (c) All-electrically switchable arbitrary vector vortex beam between two hybrid-order Poincaré spheres^[173]; (d) Generation of vector vortex beam array in ultra-broad band^[174].

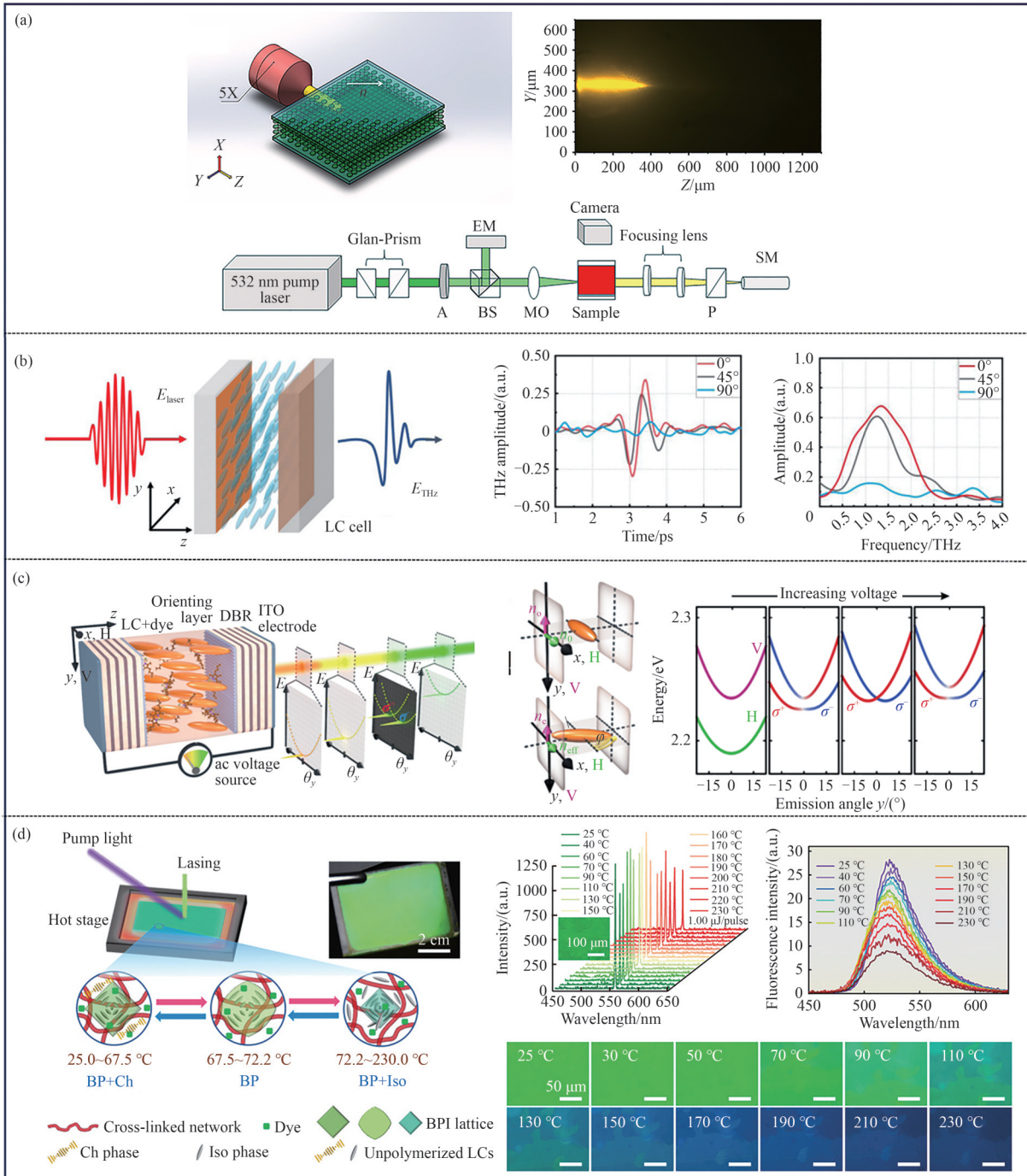


图 16 液晶激光器。(a)向列相液晶随机激光器^[179]；(b)飞秒激光激励液晶产生太赫兹辐射^[180]；(c)波长可调谐微型液晶激光器^[181]；(d)宽工作温域蓝相液晶激光器^[182]。

Fig. 16 Liquid crystal lasers. (a) Nematic liquid crystal random lasers^[179]；(b) THz generation by optical rectification of femtosecond laser pulses in a liquid crystal^[180]；(c) Wavelength tunable micro liquid crystal lasers^[181]；(d) Blue phase liquid crystal lasers with broad temperature range^[182]。

播进行研究,揭示了矢量涡旋光在医疗技术领域的巨大应用前景,如图 15(b)所示,通过级联不同液晶器件可以选择性生成或调控矢量涡旋光,研究其在模拟生物组织介质中的传播特性。当介

质浓度超过一定值时,矢量涡旋光和高斯光的空
间分布会发生突变,造成对比度突然下降。探究
矢量涡旋光与散射介质的作用机理有望推动对类
人体组织介质散射效应的进一步研究,促进生物

医学检测技术的发展。Zhu 等人^[178]提出了利用矢量涡旋光实现高维信息编码的方法,如图 15(c)所示。利用加热板加热模拟大气湍流,调节加热板的温度控制湍流强度;通过对通信协议的误码率进行测量,计算互信息模式数量的变化关系。结果表明,在较强湍流的情况下,互信息数值才呈现下降的趋势。此方案无需引入任何器件补偿大气湍流,能够有效降低通信系统的成本。

3.6 波长调控

基于螺旋超结构的动态响应特性,液晶材料在光场波长维度调控中展现出卓越的灵活性,其中包括胆甾相液晶的选择性反射调谐以及蓝相液晶的禁带工程。胆甾相液晶的分子呈周期性螺旋排列,形成一维光子晶体结构,通过外场调控螺距,可以动态改变反射带中心波长。蓝相液晶具有立方晶格结构,其光子禁带宽度仅 10~30 nm,通过调控晶格常数可实现禁带位置的精确调谐。液晶螺旋结构的动态重构与增益介质的受激辐射协同作用,极大促进了液晶激光器从固定波长向动态多模的跨越,实现了从可见光到近红外波段的宽范围波长调谐,为光通信、生物医学等领域提供了新型光源解决方案。

3.6.1 液晶激光器

可调谐激光器作为激光领域的重点研究方向,可以通过调节工作频率产生不同波长的激光。液晶可调谐激光器基于液晶材料的自组装和外场可调谐特性,具有波长调谐范围广的优势。如图 16(a)所示,Huang 等人^[179]为了解决液晶激光器传输损耗大的问题,提出了一种基于波导效应的向列相液晶随机激光器,降低了偏振方向位于液晶主平面内的随机激光传输损耗。基于液晶的电光效应,水平偏振方向的随机激光能够逐渐转变为垂直偏振。Wang 等人^[180]首次报道了利用飞秒激光激励液晶产生椭圆偏振态的宽带太赫兹辐射现象,如图 16(b)所示。相比于其他电光晶体,液晶不仅能在飞秒激光作用下基于光整流效应产生太赫兹辐射,还能够在强飞秒激光泵浦下被重新取向。如图 16(c)所示,Marcin

Muszyński 等人^[181]将掺杂有机激光染料的液晶填充于光学微腔中,研发了一种微型液晶激光器,波长调谐范围达 40 nm。

Kristiaan 等人^[183]结合量子点与手性向列相液晶,设计了一种长使用寿命的柔性薄膜激光器。由于手性向列相液晶具有自组装的特性,可沿自身螺旋轴周期性调制光学特性。当激光波长与手性向列相液晶的一维光子带隙匹配时,旋向性与其相同的圆偏振光会被反射。在 532 nm 波长泵浦激光作用下,该激光器成功产生了圆偏振激光且线宽达 80 pm。如图 16(d)所示,Chen 等人^[182]在研制宽温域聚合物稳定蓝相液晶的基础上,通过调控可聚合液晶单体含量形成稳定的蓝相聚合物支架,实现了蓝相液晶激光器 25~230 °C 的宽工作温域。

4 总结与展望

基于液晶材料的光场调控技术历经数十年发展,已从传统显示领域的单一振幅调控,逐步拓展至相位、偏振、模式、波长等多维度协同操控。随着液晶光控取向技术与微纳加工工艺的进步,该技术正朝着动态化、多功能集成方向演进。一方面,通过几何相位调制与复振幅编码,实现涡旋光拓扑荷动态切换、矢量光束偏振态重构等复杂光场生成;另一方面,借助胆甾相液晶螺旋结构与超表面复合设计,实现可见到近红外波段的波长调谐与无衍射光束轨迹优化。

当前,液晶光场调控技术已在光学加密、光通信、生物医学等领域展现独特优势,但仍面临着多重技术瓶颈。例如,多功能多层器件集成时的光场串扰、宽光谱应用中的色差校正、偏振依赖导致的调控局限性,以及微纳加工中像素尺寸缩小至亚微米级时的取向精度不足等问题。未来,结合铁电液晶超快响应特性与机器学习算法融合,开发偏振无关型超表面-液晶复合结构,同时突破宽带消色差相位调制技术,有望推动液晶光场调控在量子信息、极端环境光学等前沿领域的深度应用。

参 考 文 献:

- [1] FORBES A, DE OLIVEIRA M, DENNIS M R. Structured light [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(4): 253-262.
- [2] ALLEN L, BARNETT S M, PADGETT M J. *Optical Angular Momentum* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.

- [3] PADGETT M, COURTIAL J, ALLEN L. Light's orbital angular momentum [J]. *Physics Today*, 2004, 57(5): 35-40.
- [4] BLIOKH K Y, NORI F. Spatiotemporal vortex beams and angular momentum [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(3): 033824.
- [5] ZHAN Q W. Cylindrical vector beams: from mathematical concepts to applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2009, 1(1): 1-57.
- [6] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Observation of accelerating Airy beams [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(21): 213901.
- [7] BROKY J, SIVILOGLOU G A, DOGARIU A, *et al.* Self-healing properties of optical Airy beams [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12880-12891.
- [8] SIVILOGLOU G A, BROKY J, DOGARIU A, *et al.* Ballistic dynamics of Airy beams [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(3): 207-209.
- [9] JOHANNISSON P, ANDERSON D, LISAK M, *et al.* Nonlinear Bessel beams [J]. *Optics Communications*, 2003, 222(1-6): 107-115.
- [10] GRIER D G. A revolution in optical manipulation [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 810-816.
- [11] DU J, WANG J. High-dimensional structured light coding/decoding for free-space optical communications free of obstructions [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4827-4830.
- [12] YU W T, JI Z H, DONG D S, *et al.* Super-resolution deep imaging with hollow Bessel beam STED microscopy [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(1): 147-152.
- [13] NI J C, WANG C W, ZHANG C C, *et al.* Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17011.
- [14] LIU W W, LI Z C, ANSARI M A, *et al.* Design strategies and applications of dimensional optical field manipulation based on metasurfaces [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(30): 2208884.
- [15] ISHIZAKI K, NODA S. Manipulation of photons at the surface of three-dimensional photonic crystals [J]. *Nature*, 2009, 460(7253): 367-370.
- [16] DE GENNES P G, PROST J. *The Physics of Liquid Crystals* [M]. Oxford: Oxford University Press, 1993.
- [17] BLINOV L M. Electro-optical effects in liquid crystals [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1975, 17(5): 658-672.
- [18] 曹慧敏, 吴赛博, 王靖阁, 等. 光取向液晶微结构及其光子元件[J]. 液晶与显示, 2021, 36(7): 921-938.
CAO H M, WU S B, WANG J G, *et al.* Photoalignment enabled liquid crystal microstructures for optics and photonics [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(7): 921-938. (in Chinese)
- [19] ZHANG J, OSTROVERKHOV V, SINGER K D, *et al.* Electrically controlled surface diffraction gratings in nematic liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(6): 414-416.
- [20] RIZA N A, DEJULE M C. Three-terminal adaptive nematic liquid-crystal lens device [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(14): 1013-1015.
- [21] BELLINI T, RADZIHOVSKY L, TONER J, *et al.* Universality and scaling in the disordering of a smectic liquid crystal [J]. *Science*, 2001, 294(5544): 1074-1079.
- [22] BELYAKOV V A, DMITRIENKO V E, ORLOV V P. Optics of cholesteric liquid crystals [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1979, 22(2): 64-88.
- [23] MITOV M. Cholesteric liquid crystals with a broad light reflection band [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(47): 6260-6276.
- [24] LEE B W, CLARK N A. Alignment of liquid crystals with patterned isotropic surfaces [J]. *Science*, 2001, 291(5513): 2576-2580.
- [25] VARGHESE S, NARAYANANKUTTY S, BASTIAANSEN C, *et al.* Patterned alignment of liquid crystals by μ -rubbing [J]. *Advanced Materials*, 2004, 16(18): 1600-1605.
- [26] LIOU W R, CHEN C Y, HO J J, *et al.* An improved alignment layer grown by oblique evaporation for liquid crystal devices [J]. *Displays*, 2006, 27(2): 69-72.
- [27] GRÜNER C, LIEDTKE S, BAUER J, *et al.* Morphology of thin films formed by oblique physical vapor deposition [J].

- ACS *Applied Nano Materials*, 2018, 1(3): 1370-1376.
- [28] SCHADT M, SEIBERLE H, SCHUSTER A. Optical patterning of multi-domain liquid-crystal displays with wide viewing angles [J]. *Nature*, 1996, 381(6579): 212-215.
- [29] 高少华, 禹宣伊, 宋筱, 等. 基于飞秒激光直写的液晶面外区域定向技术及其应用[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508009.
- GAO S H, YU X Y, SONG X, *et al.* Compartmentalized out-of-plane alignment of liquid crystals based on femtosecond laser direct writing and its applications [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508009. (in Chinese)
- [30] 邹凤萍, 毕伟华, 段然, 等. ZnO 纳米结构对液晶取向控制研究[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(1): 1-6.
- ZOU F P, BI W H, DUAN R, *et al.* Effects of ZnO nanostructures on the alignment control of liquid crystals [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(1): 1-6. (in Chinese)
- [31] CHIGRINOV V, SUN J T, WANG X Q. Photoaligning and photopatterning: New LC technology [J]. *Crystals*, 2020, 10(4): 323.
- [32] CHIGRINOV V G, KOZENKOV V M, KWOK H S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications* [M]. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2008.
- [33] ICHIMURA K, SUZUKI Y, SEKI T, *et al.* Reversible change in alignment mode of nematic liquid crystals regulated photochemically by command surfaces modified with an azobenzene monolayer [J]. *Langmuir*, 1988, 4(5): 1214-1216.
- [34] KANG W X, TANG Y Q, MENG X Y, *et al.* A photo- and thermo-driven azoarene-based circularly polarized luminescence molecular switch in a liquid crystal host [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(48): e202311486.
- [35] SCHADT M, SCHMITT K, KOZINKOV V, *et al.* Surface-induced parallel alignment of liquid crystals by linearly polymerized photopolymers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(7R): 2155-2164.
- [36] HUANG Y S, ZHOU Y, ZENG X L, *et al.* Reversible crosslinking of commodity polymers via photocontrolled metal-ligand coordination for high-performance and recyclable thermoset plastics [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(41): 2305517.
- [37] NISHIKAWA M, TAHERI B, WEST J L. Mechanism of unidirectional liquid-crystal alignment on polyimides with linearly polarized ultraviolet light exposure [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(19): 2403-2405.
- [38] CHIGRINOV V, PIKIN S, VERVOCHNIKOV A, *et al.* Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 061713.
- [39] AKIYAMA H, KAWARA T, TAKADA H, *et al.* Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cells [J]. *Liquid Crystals*, 2002, 29(10): 1321-1327.
- [40] MENG C L, TSENG M, TANG S T E, *et al.* Optical rewritable liquid crystal displays without a front polarizer [J]. *Optics Letters*, 2018;43(4): 899-902.
- [41] ZHANG J F, MENG C L, HUANG J C, *et al.* Strong linearly polarized photoluminescence and electroluminescence from halide perovskite/azobenzene dye composite film for display applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2020;8(7): 1901824.
- [42] SRIVASTAVA A K, ZHANG W L, SCHNEIDER J, *et al.* Photoaligned nanorod enhancement films with polarized emission for liquid-crystal-display applications [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(33): 1701091.
- [43] 刘思嘉, 张逸恒, 朱琳, 等. 基于光取向技术的液晶螺旋达曼波带片[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(1): 1-9.
- LIU S J, ZHANG Y H, ZHU L, *et al.* Liquid crystal spiral Dammann zone plates based on photoalignment technology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 1-9. (in Chinese)
- [44] HU W, KUMAR SRIVASTAVA A, LIN X W, *et al.* Polarization independent liquid crystal gratings based on orthogonal photoalignments [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(11): 111116.
- [45] LU X M, LEE F K, SHENG P, *et al.* Substrate patterning for liquid crystal alignment by optical interference [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(24): 243508.
- [46] XIONG J H, YANG Q, LI Y N Q, *et al.* Holo-imprinting polarization optics with a reflective liquid crystal

- hologram template [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 54.
- [47] WU H, HU W, HU H C, *et al.* Arbitrary photo-patterning in liquid crystal alignments using DMD based lithography system [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16684-16689.
- [48] WEI B Y, HU W, MING Y, *et al.* Generating switchable and reconfigurable optical vortices via photopatterning of liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(10): 1590-1595.
- [49] LONG Q Z, YAO L S, SHAO J J, *et al.* Tunable photoinduced liquid crystal retarders for all-optical diffractive deep neural networks [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(11): 4778-4785.
- [50] 刘澍鑫, 庄仲森, 李燕, 等. 基于单步曝光的光配向液晶器件研究及应用[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 761-771.
- LIU S X, ZHUANG Z S, LI Y, *et al.* Research and application: liquid crystal devices fabricated by single-exposure photoalignment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 761-771. (in Chinese)
- [51] MENG C L, WU J S, KOS Ž, *et al.* Emergent dimer-model topological order and quasiparticle excitations in liquid crystals: Combinatorial vortex lattices [J]. *Physical Review X*, 2025, 15(2): 021084.
- [52] MENG C L, WU J S, SMALYUKH I I. Topological steering of light by nematic vortices and analogy to cosmic strings [J]. *Nature Materials*, 2023, 22(1): 64-72.
- [53] 杨林, 邹鑫, 蒙翠玲. 软光子拓扑结构的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(12): 1636-1656.
- YANG L, ZOU X, MENG C L. Overview of soft-photonic topological structures [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(12): 1636-1656. (in Chinese)
- [54] GUO Y B, JIANG M, PENG C H, *et al.* High-resolution and high-throughput plasmonic photopatterning of complex molecular orientations in liquid crystals [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(12): 2353-2358.
- [55] JIANG M, YU H, FENG X Y, *et al.* Liquid crystal Pancharatnam-Berry micro-optical elements for laser beam shaping [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(23): 1800961.
- [56] GUO Y B, JIANG M, PENG C H, *et al.* Designs of plasmonic metamasks for photopatterning molecular orientations in liquid crystals [J]. *Crystals*, 2017, 7(1): 8.
- [57] SHI Y P, SALTER P S, LI M, *et al.* Two-photon laser-written photoalignment layers for patterning liquid crystalline conjugated polymer orientation [J]. *Advanced Functional Materials*, 2021, 31(7): 2007493.
- [58] CAI W F, KONG D L, MA Z J, *et al.* Optically anisotropic, electrically tunable microlens arrays formed via single-step photopolymerization-induced phase separation in polymer/liquid-crystal composite materials [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4(4): 359-371.
- [59] WANG X H, WANG B, BOS P J, *et al.* Modeling and design of an optimized liquid-crystal optical phased array [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(7): 073101.
- [60] MCMANAMON P F, DORSCHNER T A, CORKUM D L, *et al.* Optical phased array technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [61] ZHANG Y, WANG Q D, JIANG H L, *et al.* Dynamic response characteristics of optical beam deflection in liquid crystal optical phased array [J]. *Optics Express*, 2024, 32(20): 35733-35742.
- [62] ZHOU S L, CAO J, HAO Q, *et al.* All-solid-state omnidirectional fast scanning using liquid crystal optical phased array and conical mirror [J]. *Optics Express*, 2025, 33(8): 18124-18135.
- [63] WANG X R, WU L, HE X X, *et al.* Theoretical analysis on power stability and switch time of the non-mechanical beam steering using liquid crystal optical phased array [J]. *Liquid Crystals*, 2018, 45(10): 1477-1486.
- [64] 王瑞, 吴双红, 汪相如, 等. 中红外液晶光学移相器的相位调制和响应时间特性[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(10): 1369-1376.
- WANG R, WU S H, WANG X R, *et al.* Phase modulation and response time characteristics of mid-infrared liquid crystal optical phase shifter [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(10): 1369-1376. (in Chinese)
- [65] NOTAROS M, DESANTIS D M, RAVAL M, *et al.* Liquid-crystal-based visible-light integrated optical phased arrays and application to underwater communications [J]. *Optics Letters*, 2023, 48(20): 5269-5272.
- [66] MICHALKIEWICZ A, KUJAWINSKA M, KOZACKI T, *et al.* Holographic three-dimensional displays with liquid crystal on silicon spatial light modulator [C]//*Proceedings of SPIE 5531, Interferometry XIII: Techniques and*

- Analysis*. Denver, Colorado, United States: SPIE, 2004: 85-94.
- [67] ZHENG Y W, CHU F, LIN F C, *et al.* Wide-viewing-angle color holographic 3D display system with high brightness encoding [J]. *Photonix*, 2025, 6(1): 3.
- [68] 隋晓萌,何泽浩,曹良才,等. 基于液晶空间光调制器的复振幅全息显示进展[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 797-809.
- SUI X M, HE Z H, CAO L C, *et al.* Recent progress in complex-modulated holographic display based on liquid crystal spatial light modulators [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 797-809. (in Chinese)
- [69] 郑义微,王迪,李移隆,等. 基于液晶空间光调制器的大视角全息显示技术[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(6): 789-796.
- ZHENG Y W, WANG D, LI Y L, *et al.* Holographic display technology with large viewing angle based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(6): 789-796. (in Chinese)
- [70] YANG Y Q, KANG X W, CAO L C. Robust propagation of a steady optical beam through turbulence with extended depth of focus based on spatial light modulator [J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2023, 5(3): 035002.
- [71] FRUMKER E, SILBERBERG Y. Phase and amplitude pulse shaping with two-dimensional phase-only spatial light modulators [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(12): 2940-2947.
- [72] ROSALES-GUZMÁN C, FORBES A. *Structured Light with Spatial Light Modulators* [M]. 2nd ed. Bellingham, Washington: SPIE, 2024.
- [73] PADGETT M, BOWMAN R. Tweezers with a twist [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 343-348.
- [74] ITOH Y, LANGLOTZ T, ZOLLMANN S, *et al.* Computational phase-modulated eyeglasses [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2021, 27(3): 1916-1928.
- [75] XIA X X, WANG W S, GUAN F, *et al.* Exploring angular-steering illumination-based eyebox expansion for holographic displays [J]. *Optics Express*, 2023, 31(19): 31563-31573.
- [76] TIAN L L, HU W, ZHOU H Z, *et al.* SRGAN algorithm-assisted electrically controllable zoom system based on Pancharatnam-Berry liquid crystal lens for VR/AR display [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(7): 2787-2796.
- [77] LIN Y H, CHEN M S, LIN H C. An electrically tunable optical zoom system using two composite liquid crystal lenses with a large zoom ratio [J]. *Optics Express*, 2011, 19(5): 4714-4721.
- [78] WEI Z X, HE M Q, LI S X, *et al.* Electrically tunable liquid crystal lens with varifocal capability [J]. *ACS Applied Optical Materials*, 2024, 2(10): 2175-2183.
- [79] 储繁,王琼华. 基于聚合物突起的液晶透镜阵列[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(1): 10-17.
- CHU F, WANG Q H. Liquid crystal lens array based on polymer protrusion [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 10-17. (in Chinese)
- [80] BOSCH M, SHCHERBAKOV M, WON K, *et al.* Voltage-tunable multifunctional zoom imaging metalenses [J]. *ACS Photonics*, 2025, 12(2): 728-736.
- [81] WANG Q G, GE S J, YU H G, *et al.* Liquid crystal integrated dynamic terahertz metalenses [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024, 18(12): 2400869.
- [82] BOSCH M, SHCHERBAKOV M R, WON K, *et al.* Electrically actuated varifocal lens based on liquid-crystal-embedded dielectric metasurfaces [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3849-3856.
- [83] HU Y Q, OU X N, ZENG T B, *et al.* Electrically tunable multifunctional polarization-dependent metasurfaces integrated with liquid crystals in the visible region [J]. *Nano Letters*, 2021, 21(11): 4554-4562.
- [84] ZHU S Q, JIANG Q, WANG Y T, *et al.* Nonmechanical varifocal metalens using nematic liquid crystal [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(6): 1169-1176.
- [85] SHAPER A, WILCZEK F. *Geometric Phases in Physics* [M]. Singapore: World Scientific, 1989.
- [86] JIANG M, GUO Y B, YU H, *et al.* Low f -number diffraction-limited Pancharatnam-Berry microlenses enabled by plasmonic photopatterning of liquid crystal polymers [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(18): 1808028.
- [87] CHEN S Y, LIN J H, HE Z Q, *et al.* Planar Alvarez tunable lens based on polymeric liquid crystal Pancharatnam-Berry

- optical elements [J]. *Optics Express*, 2022, 30(19): 34655-34664.
- [88] DING Y Q, HUANG X J, MA Y Z Y, *et al.* High-efficiency RGB achromatic liquid crystal diffractive optical elements [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2025, 8(3): 240181.
- [89] YIN K, HSIANG E L, ZOU J Y, *et al.* Advanced liquid crystal devices for augmented reality and virtual reality displays: principles and applications [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 161.
- [90] LI S L, CHEN Z Y, CHEN P, *et al.* Geometric phase-encoded stimuli-responsive cholesteric liquid crystals for visualizing real-time remote monitoring: humidity sensing as a proof of concept [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 27.
- [91] LI Y N Q, ZHAN T, YANG Z Y, *et al.* Broadband cholesteric liquid crystal lens for chromatic aberration correction in catadioptric virtual reality optics [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 6011-6020.
- [92] MAIMONE A, WANG J R. Holographic optics for thin and lightweight virtual reality [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(4): 67.
- [93] WANG Y, PENG F L, GENG Y, *et al.* High performance LCD for future VR [C]. 2024 31st International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD). Kyoto, Japan: IEEE, 2024: 1-3.
- [94] PENG F L, GENG Y, WANG J R, *et al.* Liquid crystals for virtual reality (VR) [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52(1): 427-430.
- [95] KIM J, OH C, ESCUTI M J, *et al.* Wide-angle nonmechanical beam steering using thin liquid crystal polarization gratings [C]//*Proceedings of SPIE 7093, Advanced Wavefront Control: Methods, Devices, and Applications V*. San Diego, California, United States: SPIE, 2008: 709302.
- [96] 袁方, 谭庆贵, 王光耀, 等. 基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转[J]. *液晶与显示*, 2022, 37(11): 1411-1419.
- YUAN F, TAN Q G, WANG G Y, *et al.* Fast and large-angle optical beam deflection based on liquid crystal polarization grating [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1411-1419. (in Chinese)
- [97] HE Z Q, YIN K, WU S T. Miniature planar telescopes for efficient, wide-angle, high-precision beam steering [J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10(1): 134.
- [98] CHEN R, LEE Y H, ZHAN T, *et al.* Multistimuli-responsive self-organized liquid crystal Bragg gratings [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(9): 1900101.
- [99] WENG Y S, ZHANG Y N, CUI J Y, *et al.* Liquid-crystal-based polarization volume grating applied for full-color waveguide displays [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(23): 5773-5776.
- [100] JOHN W DST, FRITZ W J, LU Z J, *et al.* Bragg reflection from cholesteric liquid crystals [J]. *Physical Review E*, 1995, 51(2): 1191-1198.
- [101] DING Y Q, ZHANG Y F, MA Y Z Y, *et al.* Polarization conversion effect in cholesteric liquid crystal-based polarization volume gratings [J]. *Optics Express*, 2024, 32(25): 44425-44436.
- [102] HE Z Q, LEE Y H, YIN K, *et al.* Recent advances in liquid-crystal polarization volume gratings [C]//*Proceedings of SPIE 11092, Liquid Crystals XXIII*. San Diego, California, United States: SPIE, 2019: 10-19.
- [103] 林子健, 姚立胜, 金华健, 等. 偏振光复用的液晶体光栅波导 AR 近眼显示系统[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 646-655.
- LIN Z J, YAO L S, JIN H J, *et al.* Polarized light multiplexing liquid crystal grating waveguide for AR near-eye display systems [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 646-655. (in Chinese)
- [104] 白梓嫣, 蔡文锋, 成茗, 等. 液晶偏振体光栅及其在增强现实波导显示中的应用[J]. *液晶与显示*, 2024, 39(5): 629-645.
- BAI Z Y, CAI W F, CHENG M, *et al.* Liquid crystal polarization volume gratings and their applications in augmented reality waveguide displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 629-645. (in Chinese)
- [105] LI Y L, LI N N, WANG D, *et al.* Tunable liquid crystal grating based holographic 3D display system with wide viewing angle and large size [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 188.
- [106] WENG Y S, ZHANG Y N, WANG W, *et al.* High-efficiency and compact two-dimensional exit pupil expansion design for diffractive waveguide based on polarization volume grating [J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6601-6614.

- [107] WANG D, LI N N, LI Y L, *et al.* Large viewing angle holographic 3D display system based on maximum diffraction modulation [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2023, 4: 18.
- [108] WANG D, LI Y L, CHU F, *et al.* Color liquid crystal grating based color holographic 3D display system with large viewing angle [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 16.
- [109] SCHADT M. Nematic liquid crystals and twisted-nematic LCDs [J]. *Liquid Crystals*, 2015, 42(5/6): 646-652.
- [110] LIEN A. Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid-crystal display at oblique incidence [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 57(26): 2767-2769.
- [111] CHEN H W, HE J, WU S T. Recent advances on quantum-dot-enhanced liquid-crystal displays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(5): 1900611.
- [112] SRIVASTAVA A K, ZHANG W L, SCHNEIDER J, *et al.* Luminescent down-conversion semiconductor quantum dots and aligned quantum rods for liquid crystal displays [J]. *Advanced Science*, 2019, 6(22): 1901345.
- [113] SCHNEIDER J, ZHANG W L, SRIVASTAVA A K, *et al.* Photoinduced micropattern alignment of semiconductor nanorods with polarized emission in a liquid crystal polymer matrix [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3133-3138.
- [114] ZHANG W L, SCHNEIDER J, CHIGRINOV V G, *et al.* Optically addressable photoaligned semiconductor nanorods in thin liquid crystal films for display applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(16): 1800250.
- [115] 汪思涵,王骁乾,薛文彬,等. 基于液晶调制光偏振的荧光量子点显示模式[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(1): 32-39.
WANG S H, WANG X Q, XUE W B, *et al.* Fluorescent quantum dot display mode based on light polarization modulation via liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 32-39. (in Chinese)
- [116] DEMOS S G, ALFANO R R. Optical polarization imaging [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(1): 150-155.
- [117] ANDREOU A G, KALAYJIAN Z K. Polarization imaging: principles and integrated polarimeters [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, 2(6): 566-576.
- [118] HEILMEIER G H, ZANONI L A. Guest-host interactions in nematic liquid crystals. A new electro-optic effect [J]. *Applied Physics Letters*, 1968, 13(3): 91-92.
- [119] GARBOVSKIY Y, EMELYANENKO A V, GLUSHCHENKO A. Inverse “guest-host” effect: ferroelectric nanoparticles mediated switching of nematic liquid crystals [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(31): 16438-16442.
- [120] LEE N K, AHN H S, KIM M S, *et al.* Guest-host liquid crystal polarizer for electrically switchable polarization in CCTV systems [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): 5413.
- [121] ZHAO X J, BERMAK A, BOUSSAID F, *et al.* Liquid-crystal micropolarimeter array for full Stokes polarization imaging in visible spectrum [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 17776-17787.
- [122] ZHAO X J, BOUSSAID F, BERMAK A, *et al.* High-resolution thin “guest-host” micropolarizer arrays for visible imaging polarimetry [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5565-5573.
- [123] FAN X Y, MA W Y, ZHANG Y M, *et al.* Broadband spatial polarization processing of light via a photopatterned dichroic medium [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(4): 041103.
- [124] 王芳,袁丛龙,王翼飞,等. 基于双层液晶功能膜的多维防伪技术[J]. *液晶与显示*, 2023, 38(8): 1022-1030.
WANG F, YUAN C L, WANG Y F, *et al.* Multidimensional anti-counterfeit technology enabled by a double-layered functional liquid crystal film [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(8): 1022-1030. (in Chinese)
- [125] WANG J Q, MENG C L, WANG C T, *et al.* A fully self-powered, ultra-stable cholesteric smart window triggered by instantaneous mechanical stimuli [J]. *Nano Energy*, 2021, 85: 105976.
- [126] WANG J Q, MENG C L, GU Q, *et al.* Normally transparent tribo-induced smart window [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(3): 3630-3639.
- [127] MENG C L, TSENG M C, TANG S T, *et al.* Normally transparent smart window with haze enhancement via inhomogeneous alignment surface [J]. *Liquid Crystals*, 2019, 46(3): 484-491.
- [128] JEONG E, LIM Y J, RHEE J M, *et al.* Viewing angle switching of vertical alignment liquid crystal displays by controlling birefringence of homogeneously aligned liquid crystal layer [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(5):

- 051116.
- [129] ZHOU X C, QIN G K, DONG Y M, *et al.* Fast switching and high-contrast polymer-stabilized IPS liquid crystal display [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, 23(7): 333-338.
- [130] EMELYANENKO A V, POZHIDAEV E P, MOLKIN V E, *et al.* Antiferroelectric and ferroelectric liquid-crystal display: Electrically controlled birefringence color switch as a new mode [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2008, 16(8): 811-818.
- [131] BORTOLOZZO U, RESIDORI S, HUIGNARD J P. Adaptive holography in liquid crystal light-valves [J]. *Materials*, 2012, 5(9): 1546-1559.
- [132] BORTOLOZZO U, RESIDORI S, HOWELL J C. Precision Doppler measurements with steep dispersion [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(16): 3107-3110.
- [133] HUANG D J, FAN W, LI X C, *et al.* Beam shaping for 1 053-nm coherent light using optically addressed liquid crystal light valve [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(S2): S21406.
- [134] 陈一波, 沈浩, 段佳著, 等. 用于高功率密度光束控制的光寻址光阀研制[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35(4): 041012.
- CHEN Y B, SHEN H, DUAN J Z, *et al.* Development of optically addressed liquid crystal light valve for high power density beam control [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35(4): 041012. (in Chinese)
- [135] FEDOTOV V A, ROSE M, PROSVIRNIN S L, *et al.* Sharp trapped-mode resonances in planar metamaterials with a broken structural symmetry [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(14): 147401.
- [136] 杨斐, 张炳林, 盛苗苗, 等. 液晶驱动高 Q 值准连续域束缚态动态调谐. *物理学报*, 2025, 74(14): 147801.
- YANG F, ZHANG B L, SHENG M M, *et al.* Dynamic tuning of high-Q quasi-bound states in continuum driven by liquid crystal [J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, 74(14): 147801. (in Chinese)
- [137] YU B B, YANG F, ZENG M D, *et al.* Liquid crystal enables extraordinarily precise tunability for a high-Q ultra-narrowband filter based on a quasi-BIC metasurface [J]. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(2): 2413098.
- [138] XU S T, FAN J X, XUE Z Q, *et al.* Active control of terahertz quasi-BIC and asymmetric transmission in a liquid-crystal-integrated metasurface [J]. *Photonics Research*, 2024, 12(10): 2207-2213.
- [139] MANIAN A K, DONTABHAKTUNI J. Tailoring quasi-BIC states in liquid crystal-integrated WS₂ nanostructured metasurfaces for tunable high Q-factor optoelectronic devices [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2025, 8(16): 8066-8075.
- [140] WEI B Y, CHEN P, HU W, *et al.* Polarization-controllable Airy beams generated via a photoaligned director-variant liquid crystal mask [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 17484.
- [141] DAI H T, SUN X W, LUO D, *et al.* Airy beams generated by a binary phase element made of polymer-dispersed liquid crystals [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22): 19365-19370.
- [142] GAO M N, WANG J W, CAI W F, *et al.* Dynamic propagation of an Airy beam in metasurface-enabled gradiently-aligned liquid crystals [J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(22): 4205-4214.
- [143] MCGLOIN D, DHOLAKIA K. Bessel beams: diffraction in a new light [J]. *Contemporary Physics*, 2005, 46(1): 15-28.
- [144] LIN Y, SEKA W, EBERLY J H, *et al.* Experimental investigation of Bessel beam characteristics [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(15): 2708-2713.
- [145] OUADGHIRI-IDRISSI I, GIUST R, FROEHLI L, *et al.* Arbitrary shaping of on-axis amplitude of femtosecond Bessel beams with a single phase-only spatial light modulator [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 11495-11504.
- [146] SHEN Y C, SHEN Z X, ZHAO G Z, *et al.* Photopatterned liquid crystal mediated terahertz Bessel vortex beam generator [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(8): 080003.
- [147] LIU S, QI S X, LI Y K, *et al.* Controllable oscillated spin Hall effect of Bessel beam realized by liquid crystal Pancharatnam-Berry phase elements [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 219.
- [148] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes [J]. *Physical Review A*, 1992, 45(11): 8185-8189.
- [149] LI G X, RHO J, YUAN X C. Optical orbital angular momentum: Thirty years and counting [J]. *Advanced*

- Photonics*, 2023, 5(3): 030101.
- [150] LEE D, SASAKI H, FUKUMOTO H, *et al.* Orbital angular momentum (OAM) multiplexing: An enabler of a new era of wireless communications [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2017, E100. B(7): 1044-1063.
- [151] KASTRUP H A. Quantization of the canonically conjugate pair angle and orbital angular momentum [J]. *Physical Review A*, 2006, 73(5): 052104.
- [152] WEI H M, AMRITHANATH A K, KRISHNASWAMY S. 3D printing of micro-optic spiral phase plates for the generation of optical vortex beams [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(8): 599-602.
- [153] KHONINA S N, USTINOV A V, LOGACHEV V I, *et al.* Properties of vortex light fields generated by generalized spiral phase plates [J]. *Physical Review A*, 2020, 101(4): 043829.
- [154] SHU W X, LING X H, FU X Q, *et al.* Polarization evolution of vector beams generated by q -plates [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): 64-72.
- [155] CHEN S M, CAI Y, LI G X, *et al.* Geometric metasurface fork gratings for vortex-beam generation and manipulation [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(2): 322-326.
- [156] CHEN P, WEI B Y, JI W, *et al.* Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: a high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 133-139.
- [157] GE S J, CHEN P, MA L L, *et al.* Optical array generator based on blue phase liquid crystal Dammann grating [J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(4): 1087-1092.
- [158] CHEN P, MA L L, DUAN W, *et al.* Digitalizing self-assembled chiral superstructures for optical vortex processing [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(10): 1705865.
- [159] ZHANG Y H, CHEN P, XU C T, *et al.* Dynamically selective and simultaneous detection of spin and orbital angular momenta of light with thermoresponsive self-assembled chiral superstructures [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(3): 1050-1057.
- [160] LIU S J, CHEN P, GE S J, *et al.* 3D engineering of orbital angular momentum beams via liquid-crystal geometric phase [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(6): 2200118.
- [161] XU C T, ZHANG D W, YUAN R, *et al.* Optical orbital angular momentum processors with electrically tailored working bands [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(7): 2201013.
- [162] FANG X Y, REN H R, GU M. Orbital angular momentum holography for high-security encryption [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(2): 102-108.
- [163] ZHOU H Q, SAIN B, WANG Y T, *et al.* Polarization-encrypted orbital angular momentum multiplexed metasurface holography [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(5): 5553-5559.
- [164] KONG L J, SUN Y F, ZHANG F R, *et al.* High-dimensional entanglement-enabled holography [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(5): 053602.
- [165] YANG H, HE P, OU K, *et al.* Angular momentum holography via a minimalist metasurface for optical nested encryption [J]. *Light: Science & Applications*, 2023, 12(1): 79.
- [166] D'AMBROSIO V, CARVACHO G, GRAFFITTI F, *et al.* Entangled vector vortex beams [J]. *Physical Review A*, 2016, 94(3): 030304.
- [167] YUE F Y, WEN D D, XIN J T, *et al.* Vector vortex beam generation with a single plasmonic metasurface [J]. *ACS Photonics*, 2016, 3(9): 1558-1563.
- [168] INAVALLI V V G K, VISWANATHAN N K. Switchable vector vortex beam generation using an optical fiber [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(6): 861-864.
- [169] TANG M J, CHEN P, ZHANG W L, *et al.* Integrated and reconfigurable optical paths based on stacking optical functional films [J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25510-25514.
- [170] WENG X Y, DU L P, YANG A P, *et al.* Generating arbitrary order cylindrical vector beams with inherent transform mechanism [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(1): 1-8.
- [171] LIU Z X, LIU Y Y, KE Y G, *et al.* Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré sphere [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(1): 15-21.
- [172] LOU S Z, ZHOU Y Q, YUAN Y D, *et al.* Generation of arbitrary vector vortex beams on hybrid-order Poincaré

- sphere based on liquid crystal device [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8596-8604.
- [173] 周昕怡,袁伊德,张士元,等. 基于液晶器件的不同阶混合阶庞加莱球上任意矢量涡旋光束的随意产生与切换 [J]. *液晶与显示*, 2023, 38(1): 24-31.
ZHOU X Y, YUAN Y D, ZHANG S Y, *et al.* Generation and switching of arbitrary vector vortex beams on two hybrid-order Poincaré spheres with different orders based on liquid crystal device [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(1): 24-31. (in Chinese)
- [174] SUN P Z, LIU B H, WANG Y F, *et al.* Ultrabroadband multichannel vector vortex beams with versatile electrically induced functionality [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(9): 2300098.
- [175] YAO J N, WU S M, LI X L, *et al.* Generation of arbitrary vector vortex beam using a single Q-plate [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(12): 2402290.
- [176] XIAN M C, XU Y, OUYANG X, *et al.* Segmented cylindrical vector beams for massively-encoded optical data storage [J]. *Science Bulletin*, 2020, 65(24): 2072-2079.
- [177] GIANANI I, SUPRANO A, GIORDANI T, *et al.* Transmission of vector vortex beams in dispersive media [J]. *Advanced Photonics*, 2020, 2(3): 036003.
- [178] ZHU Z Y, JANASIK M, FYFFE A, *et al.* Compensation-free high-dimensional free-space optical communication using turbulence-resilient vector beams [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1666.
- [179] HUANG Y X, ZHANG X J, YU B L, *et al.* Waveguided nematic liquid crystal random lasers [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(13): 3541-3547.
- [180] WANG L, QIU H S, JIN P, *et al.* THz generation by optical rectification of femtosecond laser pulses in a liquid crystal [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(3): A89-A93.
- [181] MUSZYŃSKI M, KRÓL M, RECHCIŃSKA K, *et al.* Realizing persistent-spin-helix lasing in the regime of Rashba-Dresselhaus spin-orbit coupling in a dye-filled liquid-crystal optical microcavity [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(1): 014041.
- [182] CHEN Y J, ZHENG C L, YANG W J, *et al.* Over 200 °C broad-temperature lasers reconstructed from a blue-phase polymer scaffold [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34(47): 2206580.
- [183] MOHAMMADIMASOUDI M, GEIREGAT P, VAN ACKER F, *et al.* Quantum dot lasing from a waterproof and stretchable polymer film [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 275.

作者简介:



邹鑫,女,博士研究生,2024年于深圳大学获得硕士学位,主要从事可重构软光子拓扑结构的研究。E-mail: 202411210424@std.uestc.edu.cn



张万隆,男,博士,助理教授,2019年于香港科技大学获得博士学位,主要从事液晶微纳光学器件方面的研究。E-mail: zwl@szu.edu.cn



徐子涵,男,硕士研究生,2022年于苏州大学获得学士学位,主要从事基于激光直写的液晶衍射光学器件的研究。E-mail: 2310492038@email.szu.edu.cn